

GHEORGHE MANOLEA

SISTEME AUTOMATE DE ACȚIONARE ELECTROMECHANICĂ



GHEORGHE MANOLEA

SISTEME AUTOMATE DE ACȚIONARE ELECTROMECHANICĂ

**EDITURA UNIVERSITARIA CRAIOVA
2004**

1. PRINCIPII PRIVIND COMANDA AUTOMATĂ SECVENȚIALĂ A ACȚIONĂRILOR ELECTROMECHANICE

Documentația tehnică desenată specifică pentru instalațiile electrotehnice (scheme, diagrame, tabele) este elaborată conform unor normative specifice și servește la proiectarea, executarea, montarea și întreținerea instalațiilor respective.

1.1. Clasificarea schemelor electrice

După scopul urmărit, schemele electrice se pot grupa în trei categorii:

- scheme explicative: funcționale, de circuite, echivalente;
- scheme de conexiuni: exterioare, interioare, la borne;
- scheme de amplasare.

Schemele explicative permit înțelegerea funcționării sau efectuarea calculului de proiectare a unei instalații sau părți de instalație.

Se disting:

- a) scheme funcționale (fig.1.1) care printr-o reprezentare grafică simplă permit înțelegerea principiului de funcționare a instalației electrice.

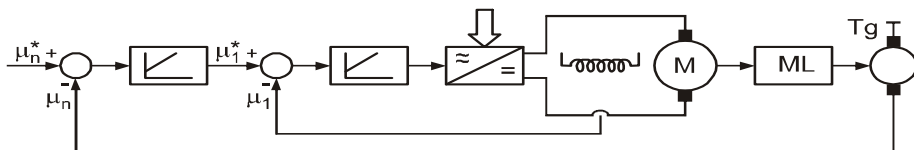


Fig.1.1. Explicativă pentru schema funcțională.

- b) scheme de circuite (fig.1.2.) reprezintă prin semne convenționale toate circuitele unei instalații sau a unei părți din instalație, cu conexiunile electrice și legăturile care intervin în funcționarea sa permițând înțelegerea în detaliu a funcționării.

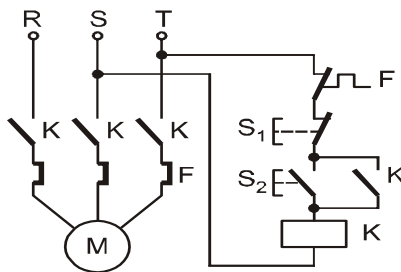


Fig.1.2. Scheme de circuit

- c) scheme echivalente destinate analizei sau calculului caracteristicilor unui circuit sau element de circuit.
- d) scheme de conexiuni, destinate execuției și verificării conexiunilor unei instalații sau echipament; aceste scheme pot fi:

- scheme de conexiuni exterioare (fig.1.3.a) prin care se indică legăturile electrice între diferite părți ale unei instalații: panouri de comandă, tablouri de alimentare, motoare electrice, aparataj electric amplasat pe utilaj;
- scheme de conexiuni interioare (fig.1.3.b) prin care se indică legăturile electrice dintre aparatele aflate în interiorul echipamentului (panou, tablou, etc);
- scheme de conexiuni la borne (fig.1.3.c) prin care se prezintă bornele unui aparat și conductoarele conectate la acestea.

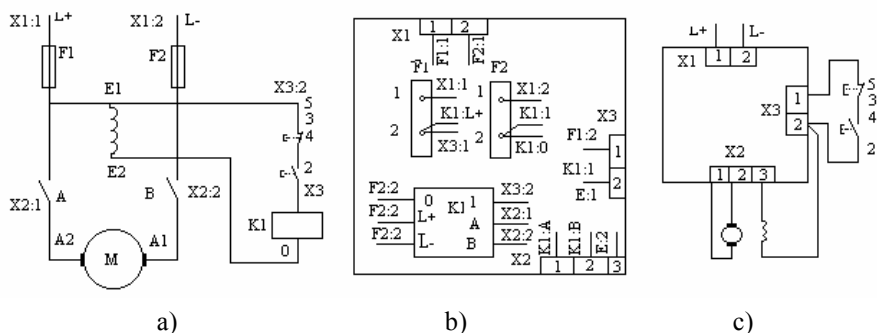


Fig. 1.3. Scheme de conexiuni: a) schemă de conexiuni exterioare;
b) schemă de conexiuni interioare; c) schemă de conexiuni la borne;

După metoda de prezentare, clasificarea schemelor se face ținând seama de:

- numărul de conductoare și aparate similare reprezentate printr-un semn convențional unic:
 - reprezentare monofilară;
 - reprezentare multifilară;
- corespondența între pozițiile semnelor convenționale pe schemă și dispunerea fizică a aparatelor în instalație;
- dispunerea relativă a semnelor convenționale corespunzătoare elementelor unui aparat (fig. 1.4):
 - reprezentarea asamblată constă în desenarea grupată a părților componente ale unui aparat;
 - reprezentarea semiasamblată constă în desenarea părților componente ale unor aparate dispersate în schemă cu specificarea legăturilor mecanice dintre acestea;
 - reprezentarea desfășurată permite reprezentarea elementelor aceluiași aparat în diferite zone ale desenului, într-un mod ce permite urmărirea logică a circuitelor și înțelegerea ușoară a funcționării instalației; toate părțile componente ale unui aparat sunt notate în schemă cu același simbol literar-numeric.

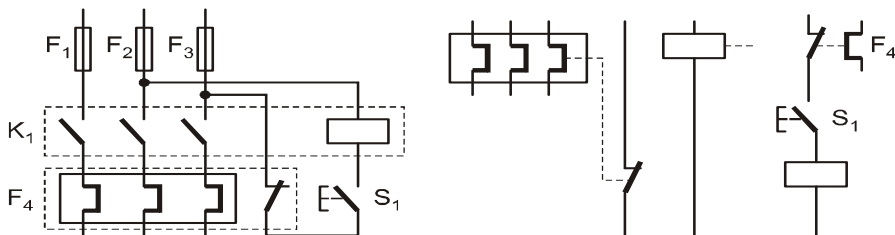


Fig. 1.4. Dispunerea semnelor convenționale corespunzătoare elementelor unui aparat.

1.2. Semne convenționale

Pentru întocmirea schemelor electrice, elementele componente sunt reprezentate prin semne convenționale standardizate (tab.1.1).

În scopul descifrării schemelor electrice la montarea, exploatarea și întreținerea utilajelor, s-a adoptat simbolizarea literal-numerică unitară prin care se stabilește un sistem coerent și flexibil de identificare a elementelor schemelor.

Reperul de identificare este format dintr-o combinație distinctă, necesară regăsirii unui element într-o schemă, diagramă sau echipament.

Reperul de identificare este format dintr-o combinație de litere și cifre arabe grupate în patru blocuri (tab.1.2). El oferă informații complete privind unitatea constructivă sau blocul în care este integrat (blocul 1), poziția fizică ocupată în cadrul unui ansamblu sau subansamblu (blocul 2), categoria din care face parte, numărul de ordine din cadrul categoriei, funcția pe care o îndeplinește în schemă (blocul 3) și codul de marcare a bornei (blocul 4).

Elementele din schemele electrice pot fi grupate în 23 de categorii (tab.1.3) notate prin litere majuscule ale alfabetului latin constituind codul categoriei (partea 3A din codul de identificare). Diferențierea dintre mai multe elemente din cadrul aceleiași categorii se realizează printr-un număr de ordine, constituind partea 3B din reperul de identificare.

Funcția îndeplinită de un element în schemă poate fi indicată arbitrar, dar trebuie să înceapă cu o literă explicată în legenda schemei și reprezintă partea 3C a reperului de identificare. De cele mai multe ori se preferă indicarea funcției generale (tab.1.4).

Exemplu de reper de identificare indicat în tabelul 2 este

$$=S01 + 3A1 - K1M:2$$

și se interpretează astfel: borna 2 a contactorului principal 1 din subansamblul A1 al ansamblului 3, care face parte din instalația S01

Simboluri grafice folosite în schemele de comandă secvențială

Denumirea elementului		Simbol conven.	Denumirea elementului		Simbol conven.
Rezistor			Mișcarea întârziată. Întârzierea are loc în sensul deplasării sectorului către centrul său		
Potențiomtru					
Bobină. Înfășurare. Inductivitate			Contacte normal deschise ND cu temporizare	a. la acționare	
Bobină cu miez de fier				b. la revenire	
Condensator			Contacte normal închise NI cu temporizare	a. la acționare	
Condensator variabil				b. la revenire	
Legare	a. la masă			c. prin tragere	
	b. la pământ			d. prin rotire	
	c. la pământ de protecție				
Contact	a. normal deschis ND		Contact releu termic	a. contact normal închis fără zăvorâre	
	b. normal închis NI			b. contact normal închis cu zăvorâre	
Limitator de cursă	a. cu contact normal deschis		Contact de forță normal închis		
	b. cu contact normal închis		Contact comutator		
Priză și fișă			Contact cu două poziții, cu poziție de mijloc		
Cablu			Contact pasager care se închide la acționare		
			Contact pasager care se închide la revenire		

Tabelul 1.1. (continuare)

Contact principal al contactorului				Frână			
Buton cu contact normal deschis ND, acționat prin împingere	a. cu revenire			Exemple frână	Motor cu frână strânsă		
	b. cu reținere				Motor cu frână nefrânat		
Buton cu contact normal închis NI, acționat prin împingere	a. cu revenire			Bobină de releu sau contactor			
	b. cu reținere			Bobină de releu cu temporizare	a. la acționare		
Întreprupător - separator	a. monopolar	a.1. monofilar			b. la revenire		
	b. bipolar	b.1. monofilar		Bobină releu	cu atragere și eliberare rapidă		
		b.2. multifilar			insensibil la curent alternativ		
	c. tripolar	c.1. monofilar			de curent alternativ		
		c.2. multifilar			polarizat		
	Separator					cu remanență	
Comandă mecanică manuală cu restricție de acces					termic		
Comandă prin buton de avarie cu ciupercă					de tensiune	nulă	
Comandă prin pedală						minimă	
Comandă prin acumulare de energie mecanică (resort)						maximă	
Comandă electromecanică					de curent	minim	
Conductoare răsucite						maxim	

Tabelul 1.1. (continuare)

Bobină releu de curent maxim temporizat			Tranzistor E - emitor B - bază C - colector	uni-joncțiune	cu bază de tip P	
Siguranță fuzibilă - simbol general					cu bază de tip N	
Siguranță fuzibilă	a. intrerupător		Cu efect de câmp P - poartă D - drenă S - sursă			
	b. separator		Fotodiodă			
Lampă de semnalizare			Diodă luminiscentă			
Aparat indicator (asteriscul se înlocuiește cu un simbol corespunzător)			Fototiristor			
Avertizor acustic (hupă)			Fototranzistor			
Diodă A - anod K - catod	semiconductoare		Generator Hall			
	Zener		Curent alternativ la 50Hz			~50
Tiristor G - grilă sau poartă	simbol general		Curent alternativ trifazat cu neutru la 50Hz, 400V, 230V între fază și neutru			3N~50Hz 400/230
	blocabil prin poartă		Perie pe colector cu lamele			
Triac			Perie pe inel colector			
Tranzistor E - emitor B - bază C - colector	NPN		Motor de curent continuu	Cu excitație serie		
	PNP			Cu excitație derivație		
	NPN cu colectorul legat la capsulă			Cu magnet permanent		

Tabelul 1.1. (continuare)

Generator de curent continuu cu excitație derivație		Motor asincron trifazat cu rotorul în scurtcircuit	
Motor cu colector, monofazat, cu excitație serie		Motor asincron trifazat cu rotorul bobinat	
Motor sincron trifazat		Motor asincron trifazat cu rotorul în scurtcircuit cu șase borne de ieșire pe stator	
Motor asincron monofazat cu rotor cu fază auxiliară cu borne de ieșire și rotor în s.c.		Motor pas cu pas	

Tabelul 1.2

Structura pe blocuri a unui reper de identificare

Blocul	1 Nivelul superior	2 Amplasare	3 Identificare			4 Bornă
			A Categorii	B Număr	C Funcție	
Semn distinctiv	=	+		-		
Codificare A-literă N-cifră	NANA...	NANA...	A	N	A(N)	STAS 1063/76
Informații furnizate	Unitatea superioară (constructivă sau funcțională) din care face parte elementul	Poziția fizică a elementului în cadrul ansamblului sau subsansamblului	Codul categoriei de care aparține elementul	Numărul de ordine al elementului în cadrul categoriei	Codul funcției îndeplinite de element în circuit	Codul de marcare a bornei
Exemple			K	1		
			K	1	M	
			K	1	M	:2
		+ 3A	-K	1	M	:2
	= ISO	+ 3A	-K	1	M	:2

Litere reper pentru identificarea categoriei elementului (blocul 3A)

Nr. crt.	Grupa de aparate sau mașini	Simbol	Exemple
1	Ansamble, subansamble funcționale	A	Amplificatoare cu tuburi, cu tranzistoare, magnetice, cu circuite integrate, laser
2	Traductoare de mărimi neelectrice în mărimi electrice și invers	B	Element termoelectric, tahogenerator, rezolver, celulă fotoelectrică, doză tensometrică
3	Condensatoare	C	
4	Dispozitive diverse	D	Elemente logice, elemente bistabile, register de memorie, etc
5	Dispozitive diverse	E	Dispozitive de iluminat, dispozitive de încălzit, alte dispozitive fără simbol literal propriu
6	Dispozitive de protecție	F	Siguranțe, relee de protecție, declanșatoare mecanice, relee centrifugale, relee de vânt, dispozitive de descărcare la supratensiune
7	Generatoare (dispozitive de alimentare)	G	Generator, alternator, baterie, dispozitiv de alimentare, convertizor static, convertizor rotativ, oscilator cu cuarț
8	Dispozitive de semnalizare	H	Avertizoare optice și acustice, lămpi de semnalizare
9	Relee și contactoare (alte decât cele de protecție)	K	
10	Inductanțe	L	Bobine de inducție, bobine de blocare
11	Motoare	M	
12	Dispozitiv de calcul, reglatoare	N	Reglatoare electronice și electromecanice, calculatoare analogice și numerice
13	Instrumente de măsură, dispozitive de încercare	P	Aparate indicatoare și înregistratoare, contoare electrice, display, oscilograf, osciloscop, ceas
14	Aparate de comutație pentru circuite electrice de forță	Q	Înteruptor, separator
15	Rezistoare	R	Rezistor cu rezistență variabilă, potențiometru, reostat, șunt, termistor
16	Aparate de comutație mecanică pentru circuite electrice	S	Comutator, buton de acționare, limitator de cursă, termistor
17	Transformatoare	T	Transformator de tensiune, curent, de rețea, de separare

18	Modulatoare, convertoare	U	Discriminator, demodulator, convertor de frecvență, optocuplor, convertor analog numeric și numeric analogic
19	Tuburi electronice, semiconductoare	V	Tub electronic, tub cu descărcare în gaze, diodă, tranzistor, tiristor
20	Căi de transmisie, antene	W	Cablu, bară, ghid de undă, antenă parabolică
21	Borne, fișe, socluri	X	Fișe și prize de conectare, fișe de testare, regletă cu cleme terminale pentru lipit
22	Dispozitive mecanice	Y	Frâne, ambreiaje, robineți, electromagneți, mașini electrice de scris, teleimprimatoare
23	Sarcini corective, filtre, egalizatoare, limitatoare	Z	Compresor de dinamică, filtru, impedențe

Tabelul 1.4

Litere reper pentru identificarea funcțiilor generale ale unui element (blocul 3C)

Litera	Funcția generală	Litera	Funcția generală
A	Auxiliar	N	Măsurare
B	Direcție de mișcare (înainte, înapoi, ridicare, coborâre, sensorar)	P	Proportional
		Q	Stare (pornit, oprit, sfârșit de cursă)
C	Numărare	R	Rearmare, ștergere
D	Diferențial	S	Introducere în memorie, înregistrare
F	Protecție	T	Temporizare
G	Încercare	V	Viteză (accelerare, frânare)
H	Semnalizare	W	Sumare
I	Integrare	X	Înmulțire
K	Apropiere (poziționare la nivel)	Y	Analogic
M	Principal	Z	Numeric

1.3. Comanda automată a pornirii prin cuplarea directă la rețea

Pornirea prin cuplare directă la rețea este frecvent întâlnită în aplicațiile practice, limitarea fiind impusă numai de puterea instalată a rețelei. Există aplicații simple, cu un număr foarte redus de echipamente de comandă (fig.1.5) la care nu se pun probleme deosebite de protecție a motorului electric de acționare, de regulă motor de curent alternativ.

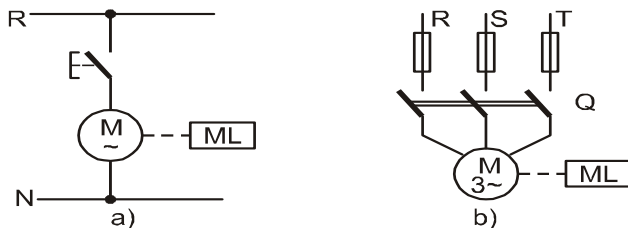


Fig.1.5. Scheme uzuale de comandă de acționări cu motor asincron: (a) monofazate, (b) trifazate

Aplicațiile care vor fi analizate în continuare presupun utilizarea unui releu sau contactor cu rol de multiplicator de căi de curent și amplificator electromecanic. Deși, în principiu, schemele de comandă pot fi specifice tipului de motor, de curent continuu sau asincron trifazat, soluțiile analizate susțin ideea modularizării, același echipament poate fi folosit atât pentru acționări de curent continuu cât și pentru acționări de curent alternativ.

1.3.1. Schema de forță

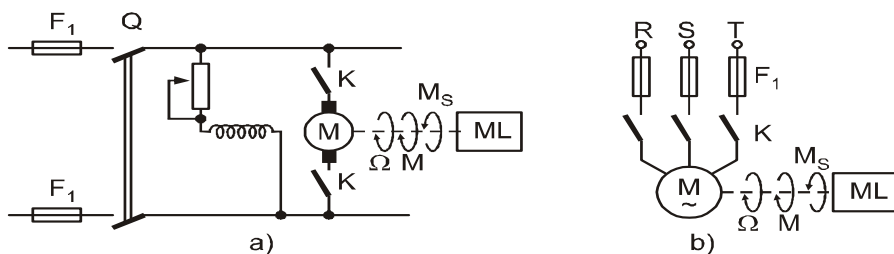
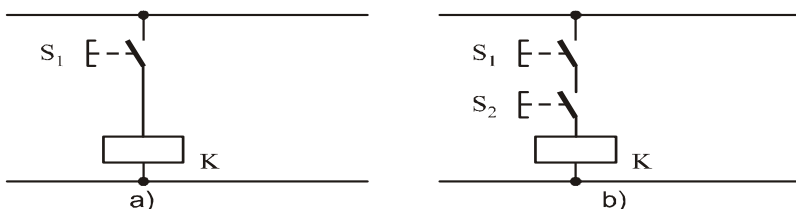


Fig.1.6. Schema de forță pentru pornirea prin cuplarea directă la rețea.

Schema de forță (fig.1.6) conține pe lângă elemente de protecție, contactele unui singur contactor de forță prin intermediul cărora indusul motorului de curent continuu, respectiv inductorul motorului asincron este cuplat la rețeaua de alimentare.

1.3.2. Schema de comandă

Schema de comandă poate avea diferite configurații, în funcție de aplicații. Pentru aplicații simple, la care mașina de lucru este permanent supravegheată de operator, schema de comandă conține (fig.1.7) numai bobina contactorului și butonul cu contact normal deschis și revenire automată. Cât timp butonul S_1 este acționat, bobina K este alimentată și contactele corespunzătoare din schema de forță (fig.1.7.a) sunt închise. La eliberarea acestuia, bobina K nu mai este alimentată și se întrerupe alimentarea motorului electric. Un exemplu tipic de aplicație îl constituie acționarea ghilotinei de tăiat hârtie din industria poligrafică, la care se introduce încă un buton (fig.1.7.b) pentru protecția operatorului care este astfel obligat să folosească ambele mâini.



În cazul acționării ventilatoarelor, pompelor, compresoarelor etc., mașini de lucru cu funcționare de lungă durată, funcția butonului de comandă este preluată, după eliberare, de un contact normal deschis al contactorului K , numit contact de automenținere (fig.1.8). Pentru oprirea acționării se utilizează butonul S_1 cu contact normal închis și revenire automată.

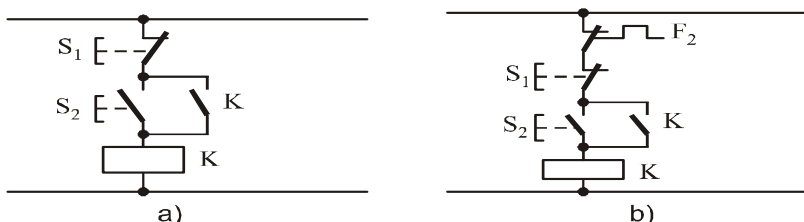


Fig.1.8. Schema de comandă automată cu automenținere pentru pornirea prin cuplare directă la rețea.

Dacă în schema de forță este introdus și un releu termic, contactul normal închis al acestuia este înseriat cu bobina K astfel încât la deschiderea lui acționarea să fie oprită.

1.4. Comanda automată a pornirii directe reversibile

1.4.1. Schema de forță

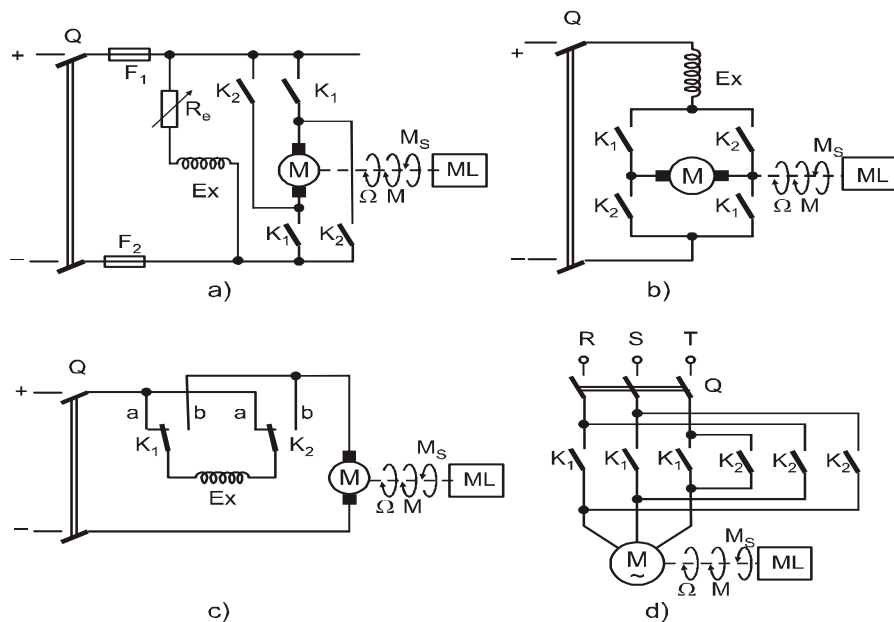


Fig.1.9. Schema de forță pentru pornirea automată reversibilă:

- a) motor de curent continuu cu excitație separată;
- b), c) motor de curent continuu cu excitație serie;
- d) motor asincron;

Pornirea acționării constă în închiderea întrerupătorului cu pârghie Q (fig.1.9). Pentru pornirea într-un sens trebuie închise contactele K_1 , iar pentru pornire în sens invers trebuie închise contactele K_2 , cu condiția ca, în mod cert, contactele K_1 să nu fie închise.

La acționarea cu motor de curent continuu serie schimbarea sensului de rotație din repaos se face utilizând două contacte de comutație în circuitul de forță (fig.1.9.c).

1.4.2. Schema de comandă

1.4.2.1. Schema de comandă clasică (fig.1.10)

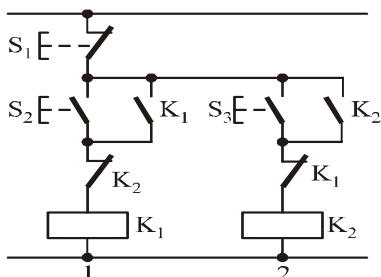


Fig.1.10. Schema de comandă

pentru pornirea reversibilă.

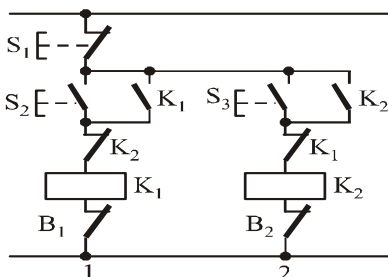


Fig.1.11. Schema de comandă pentru pornirea reversibilă cu limitator de cursă.

Se observă că, în acest caz, se regăsesc elementele schemei de comandă pentru pornirea într-un singur sens. Elementele specifice sunt:

- pentru oprire se folosește același buton S_1
- pentru a nu face posibilă comanda simultană a bobinelor K_1 și K_2 (interblocare), ceea ce ar duce la scurtcircuitarea rețelei de forță, se utilizează contactele normal închise K_2 din circuitul 1 și K_1 din circuitul 2
- pentru schimbarea sensului de rotație se apasă mai întâi butonul S_1 pentru a realiza oprirea și apoi se acționează S_3 sau S_2 pentru pornire în sensul dorit.

În unele aplicații (fig.1.11.) (poartă automată de acces) se impune oprirea automată la sfârșitul cursei. Pentru aceasta se introduce un limitator de cursă B_1 și B_2 pentru fiecare sens de deplasare.

În alte aplicații, este necesar ca reversarea să se facă printr-o singură manevră, iar oprirea acționării reprezintă o comandă distinctă. Pentru acestea se folosesc butoane duble cu contact normal deschis și normal închis, conectate ca în figura 1.12. Se constată că prin acționarea unuia dintre butoanele S_2 sau S_3 se dă atât comanda de oprire (prin CNI) cât și comanda de pornire (prin CND). Contactul B_1 este subansamblul unui traductor pentru controlul mișcării (releu de tensiune) care nu permite acceptarea comenzii de pornire în sens invers decât după oprirea acționării pentru a evita intrarea în regim de frână contracurent.

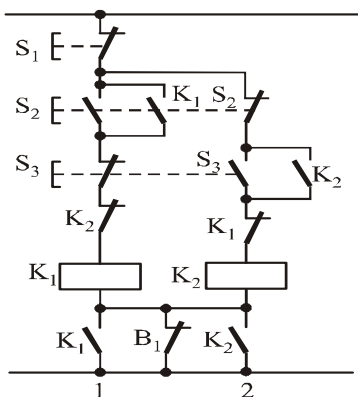


Fig.1.12. Schema de comandă pentru pornirea reversibilă cu controlul mișcării.

1.4.2.2. Schema de comandă cu microcontroler

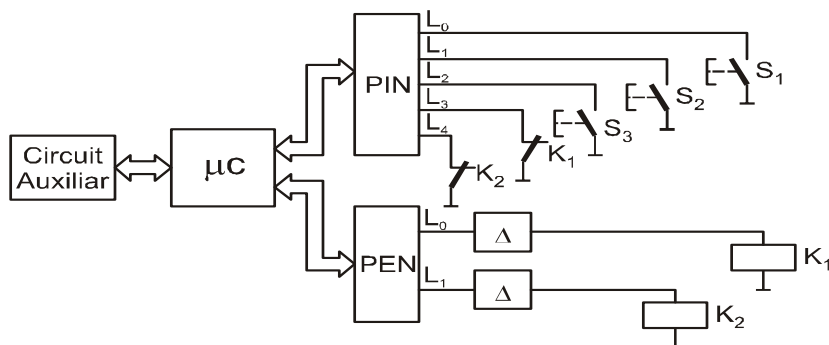


Fig.1.13. Schema de comandă cu microcontroler.

Schema de comandă cu microcontroler (fig.1.13) conține arhitectura tipică din care s-au evidențiat: microcontrolerul, porturile de comunicare PIN, PEN și circuitele auxiliare, în care aici sunt incluse toate celelalte elemente specifice.

Pentru a trece de la schema de comandă clasică la schema de comandă cu microcontroler se parcurg următoarele secvențe:

1. Se identifică elementele de intrare:
 - pentru comandă: S_1 , S_2 și S_3 .
 - pentru protecții, interblocare: contactele K_1 , K_2 .
2. Se identifică elementele de execuție: bobinele K_1 și K_2 .
3. Se atașează fiecare grupă de elemente portului corespunzător.
4. Se întocmește schema logică prin care se descrie algoritmul de funcționare al schemei (fig.1.13).
5. Se elaborează programul de comandă în limbaj de asamblare sau alt limbaj de nivel superior.
6. Se testează programul elaborat prin simulare numerică, pe modele și/sau pe schema reală.
7. Se transferă programul elaborat în memoria echipamentului de comandă.

De remarcat că, în acest caz, se poate folosi un buton cu contact normal deschis atât pentru comanda de pornire cât și pentru comanda de oprire.

La întocmirea schemei logice s-au avut în vedere următoarele:

- prin  s-a simbolizat o procedură de intrare sau ieșire: citirea unui port de intrare, transferul de informație către un port de ieșire pentru comanda elementelor de execuție sau pentru afișarea de mesaje.

- prin  s-a simbolizat un bloc de decizie.

- s-a notat cu „1” starea „activat” a unui element, iar cu „0” starea „neactivat” a unui element.

Comanda elementelor de execuție este marcată prin atribuirea bitului „1” pinului la care este conectat acest element.

Pentru o exprimare sugestivă s-a utilizat instrucțiunea OUT urmată de o succesiune de biți „1” și „0” corespunzătoare stării elementelor de execuție „comandat-1”, „necomandat-0”.

Schema logică este prezentată în figura 1.14.

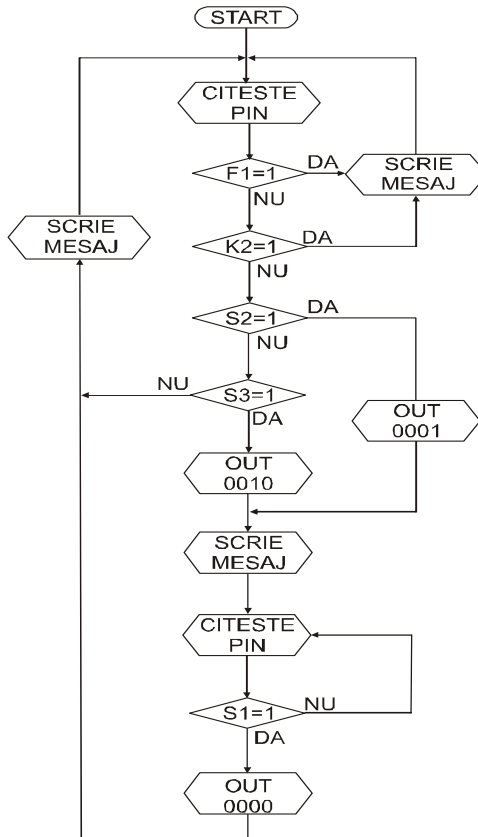


Fig.1.14. Schema logică pentru comanda automată a pornirii directe reversibile.

1.4.3. Aplicație industrială. Comanda automată a unui ascensor de materiale

Aplicația se referă la ascensoare de alimente, medicamente, cărți care transportă greutatea sub 100kg. Având în vedere simplitatea schemei clasice de comandă, se va prezenta numai varianta cu microcontroler, aplicată deja în practică.

Condiții:

La elaborarea programului de comandă s-au avut în vedere următoarele condiții, impuse de beneficiar pentru a putea aplica o tehnologie particulară de manipulare a materialului transportat:

- expedierea cabinei se poate face numai de la nivelul de bază la destinație precisă,
- chemarea cabinei se poate face numai de la nivelul de bază,
- nu se acceptă comanda de expediere sau chemare dacă o ușă este deschisă,
- după acceptarea comenzii de expediere sau chemare, acționarea nu se oprește dacă se deschide oricare ușă,
- la depășirea unui nivel limită superior sau inferior se acționează direct în circuitul de alimentare a contactoarelor de sens,
- la cuplarea energiei electrice sau revenirea energiei electrice, cabina este adusă preferențial la nivelul de bază.

Semnalizări

Se indică în clar, pe un display cu cristale lichide:

- nivelul la care se găsește cabina atât la staționare cât și la deplasare,
- nivelul la care este deschisă ușa.

Semnalizare sonoră când cabina ajunge la nivelul la care a fost expediată sau la nivelul de bază unde a fost chemată.

Schema de forță

Pentru aceste tipuri de ascensoare se folosesc motoare cu o singură viteză și de aceea shema de forță conține doar două contactoare (fig.1.15) pentru selectarea sensului de deplasare.

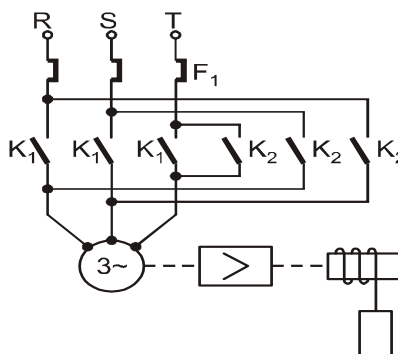


Fig.1.15. Schema de forță a acționării ascensorului.

Schema de comandă

Partea de forță a schemei de comandă conține bobinele celor două contactoare K_1 și K_2 (fig.1.16). Alimentarea lor se va face prin intermediul contactelor celor două relee MC_1 și MC_2 comandate direct de microcontroler. Contactele normal închise L_j și L_s asigură întreruperea alimentării dacă s-a depășit nivelul limită de jos sau de sus.

Partea informațională a schemei de comandă conține (fig.1.17) microcontrolerul, elemente de intrare și elemente de ieșire cu următoarele semnificații:

- C - chemare;
- E_1, E_2, E_3 - expediere nivelul 1, 2, 3;
- $N_0 \dots N_3$ - contacte de nivel;
- $u_0 \dots u_3$ - contacte ușă.

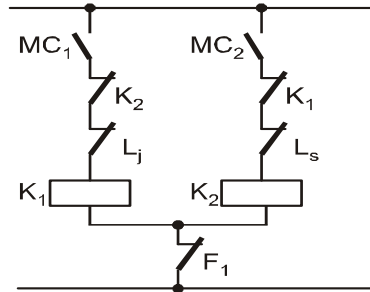


Fig.1.16. Partea de forță a schemei de comandă.

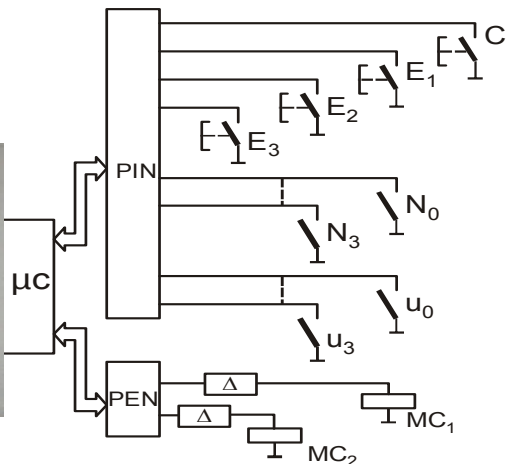


Fig.1.17. Partea informațională a schemei de comandă și vedere de ansamblu a produsului MICROAS.

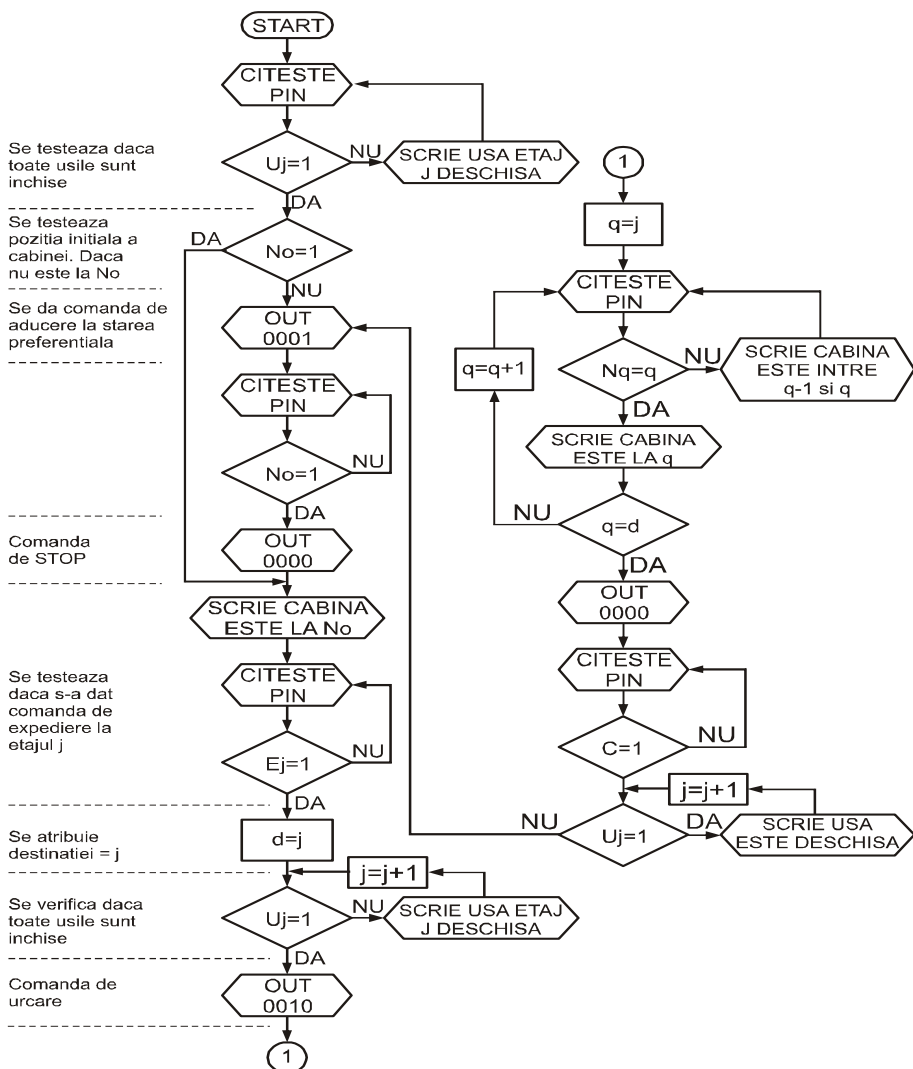


Fig.1.18. Schema logică pentru comanda ascensorului de alimente.

1.5. Comanda automată a pornirii directe și frânarea dinamică

În cazul echipamentelor de poziționare, pentru oprirea rapidă, acționarea este adusă în regim de frână dinamică.

1.5.1. Schema de forță

Se va prezenta shema de forță numai pentru acționarea cu motor asincron având în vedere actualitatea acesteia cât și faptul că schema de comandă este comună. Frânarea dinamică în regim de generator sincron fără recuperarea energiei se obține prin deconectarea statorului de la rețeaua de tensiune alternativă și conectarea la o sursă de tensiune continuă (fig.1.19). După oprirea acționării sursa de tensiune continuă se deconectează.

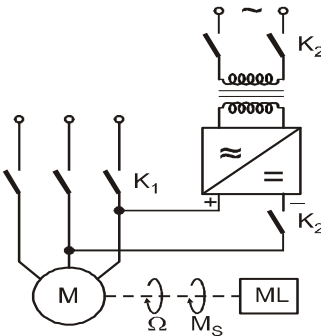


Fig.1.19. Schema de forță pentru pornirea prin cuplarea directă și frânarea dinamică a acționării cu motor asincron.

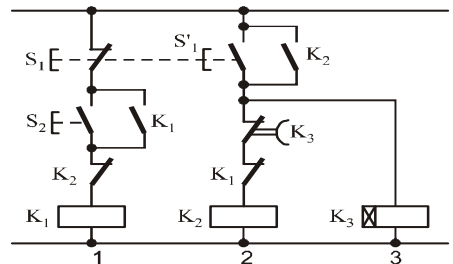


Fig.1.20. Schema de comandă pentru pornirea directă și frânarea dinamică.

1.5.2. Schema de comandă

1.5.2.1. Schema de comandă clasică

Schema de comandă conține elemente tipice pentru pornirea prin cuplare directă în care se include un element de interblocaje pentru a evita alimentarea simultană în c.a. și în c.c. (fig.1.20). În plus comanda de oprire are două efecte, deconectarea sursei de tensiune alternativă și conectarea sursei de tensiune continuă.

În acest scop se folosește butonul dublu S₁-S₁'. Odată cu comanda de oprire se comandă frânarea (K₂) și releul de timp K₃. Acesta, după un timp, își deschide contactul normal închis cu temporizare la deschidere K₃ din circuitul 2 și astfel schema de forță și cea de comandă sunt readuse în starea inițială.

1.6. Comanda automată a pornirii stea-triunghi

Pentru reducerea șocului de curent la pornire se practică frecvent pornirea stea-triunghi, care presupune că motorul funcționează în conexiune triunghi, iar cuplul dezvoltat de sarcină la pornire este mic sau dependent de viteză.

1.6.1. Schema de forță

În schema de forță clasică se utilizează, pentru protecția motorului, un releu termic (fig.1.21) care se va înlocui, în cazul comenzii cu microcontroler, cu un traductor de curent cu efect Hall.

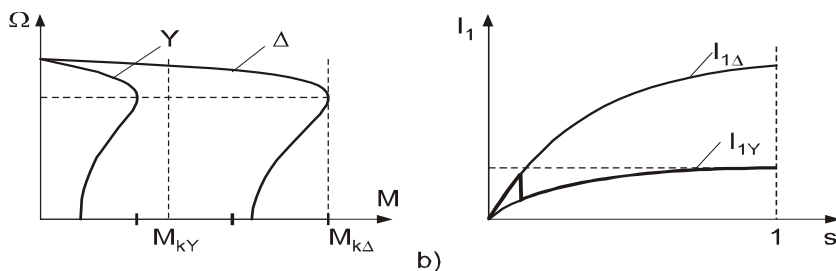
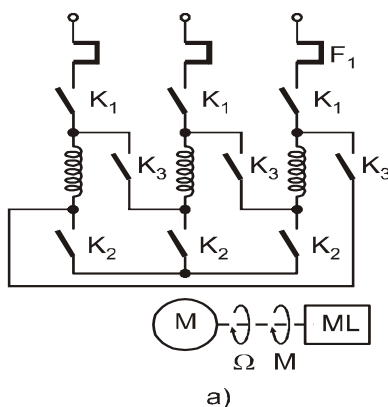


Fig.1.21. Pornirea stea-triunghi: a) schema de forță, b) caracteristicile statice.

1.6.2. Schema de comandă

1.6.2.1. Schema de comandă clasică

Comanda automată a trecerii conexiunii din stea în triunghi se realizează în funcție de timp, în funcție de viteză sau în funcție de curent. În cazul pornirii în funcție de timp (fig. 1.22), se utilizează un releu de timp care comandă schimbarea structurii părții de forță astfel încât, la comutare, curentul să fie inferior celui de pornire.

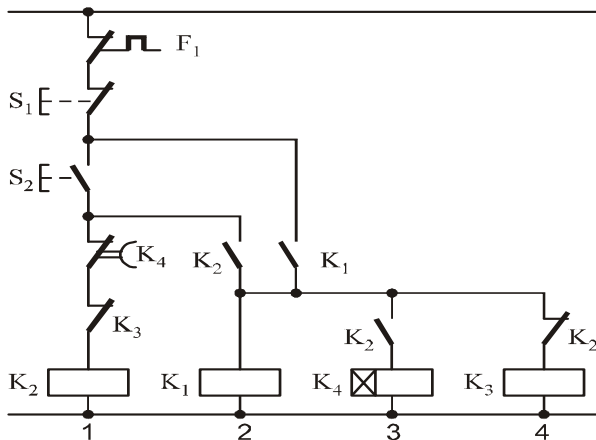


Fig.1.22. Schema de comandă clasică pentru pornirea stea-triunghi în funcție de timp.

Pentru pornire se acționează butonul S_1 cu contact normal deschis și revenire automată. Este alimentată bobina contactorului K_2 care asigură prin contactele normal deschise, conexiunea stea și alimentarea contactorului de linie K_1 respectiv a celui de timp K_4 . După temporizarea reglată se deschide contactul normal închis cu temporizare la deschidere K_4 din circuitul 1 și se întrerupe alimentarea bobinei K_2 . Se deschide conexiunea stea, contactul normal închis K_2 din circuitul 4 revine la starea normală și este alimentată bobina contactorului K_3 . Acesta, prin contactele de forță, asigură conexiunea triunghi a înfășurărilor statorice.

1.6.2.2. Schema de comandă cu microcontroler

După identificarea elementelor de intrare și a elementelor de execuție se întocmește schema din figura 1.23. În plus protecția la suprasarcină este asigurată prin măsurarea curentului cu ajutorul unui traductor cu efect Hall.

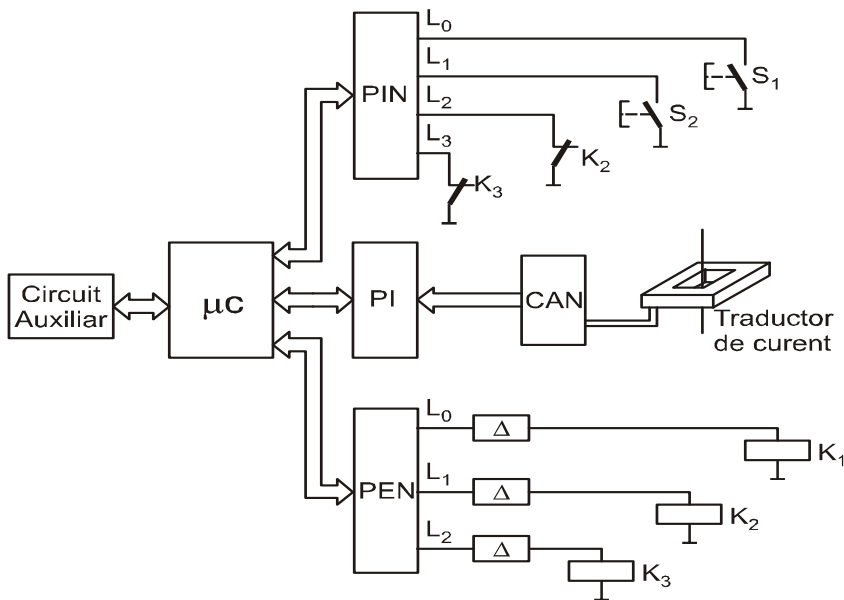


Fig.1.23. Schema de comandă cu microcontroler.

1.6.3. Schema logică

Schema logică (fig.1.24) prezintă succesiunea secvențelor asigurate și de schema clasică. Secvența de protecție la suprasarcină sau rămânerea în două faze este tratată ca o procedură distinctă care va fi tratată detaliat ulterior.

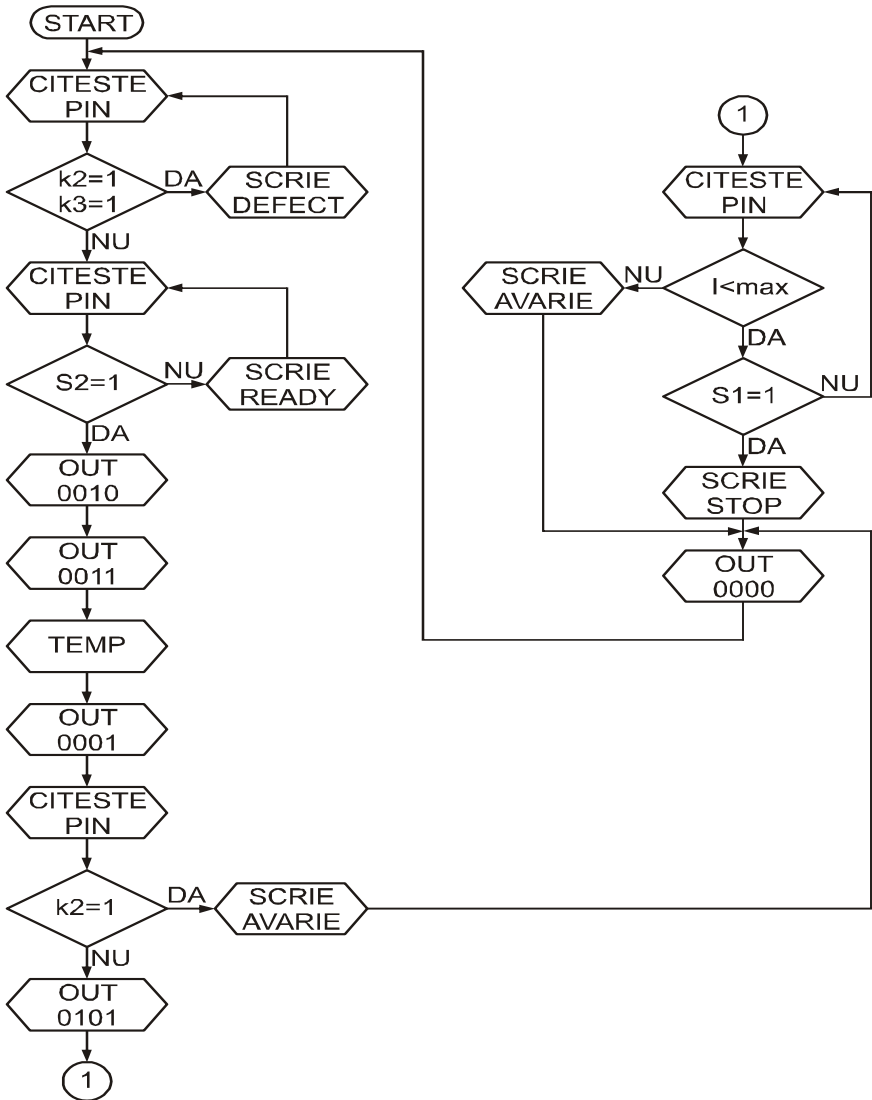


Fig.1.24. Schema logică pentru pornirea stea-triunghi în funcție de timp.

1.7. Comanda automată a pornirii reostatice a acționărilor electromecanice

Pentru acționări de ordinul sutelor de kilowați realizate cu motoare alimentate la tensiuni mai mari de 1kV se justifică și se practică pornirea reostatică.

Comanda automată poate fi făcută în funcție de timp, în funcție de viteză sau în funcție de curent; schema de forță este aceeași, apare în plus numai traductorul specific: de viteză sau de curent.

1.7.1. Schema de forță

Se consideră că reostatul de pornire este metalic, în trepte, cu două trepte de pornire (fig. 1.25). Nu s-a figurat partea de protecție la suprasarcină.

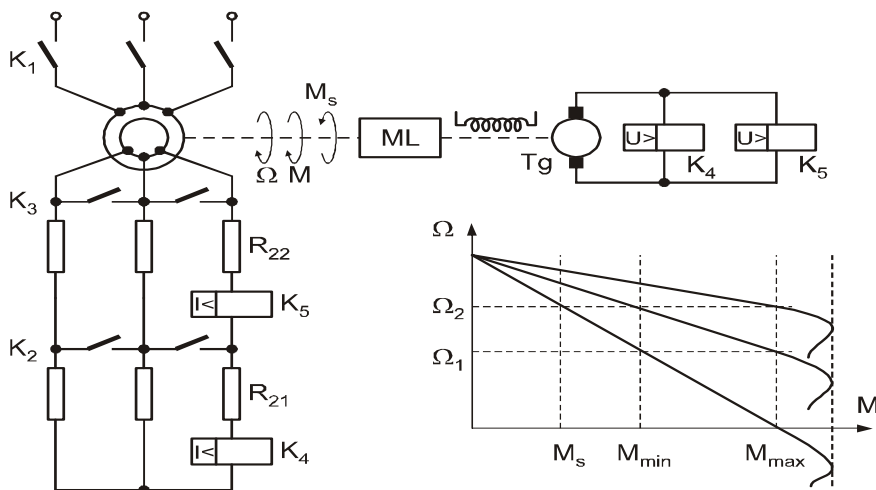


Fig.1.25. Schema de forță și caracteristicile la pornirea reostatică.

S-au utilizat aceleași notații (K_4, K_5) pentru releele minimale de curent plasate în circuitul rotorului și releele maxime de tensiune conectate la bornele tahogeneratorului Tg pentru a sublinia diferența dintre cele două variante la comanda automată.

1.7.2. Schema de comandă pentru pornirea automată în funcție de timp

Pentru pornire se apasă butonul S_2 cu contact normal deschis și revenire automată (fig.1.26) prin care se asigură alimentarea bobinei contactorului K_1 , dacă contactele normal închise K_2 , K_3 din circuitul 1 sunt închise (au revenit la starea normală). Acesta își va închide contactele normal deschise din circuitul de forță asigurând alimentarea statorului. De asemenea, se închide și contactul K_1 din circuitul 2 care alimentează bobina releului de timp K_4 . După temporizarea reglată, contactul normal deschis cu temporizare la închidere K_4 din circuitul 3 asigură alimentarea bobinei contactorului K_2 . Acesta își va închide contactele normal deschise K_2 din circuitul rotoric care scurtcircuitază prima treaptă de pornire. În continuare secvențele se repetă.

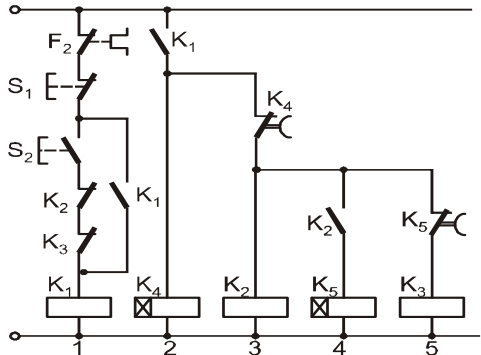


Fig.1.26. Schema de comandă automată a pornirii reostatice în funcție de timp

1.7.3. Schema de comandă pentru pornirea automată în funcție de viteză

În circuitul 1 (fig.1.27) se regăsesc toate elementele specifice: buton de pornire, buton de oprire, element de automenținere, elemente de interblocare.

Bobinele contactoarelor K_2 și K_3 de scurtcircuitare a treptelor de pornire sunt alimentate prin intermediul contactelor releelor maxime de tensiune K_4 și K_5 . Acestea au valoarea de anclanșare reglabilă astfel încât $U_{ak4}=c\Omega_1$, iar $U_{ak5}=c\Omega_2$.

Contactele normal închise K_2 și K_3 din circuitul 1 au rolul de a interzice comanda de pornire dacă, de la funcționarea anterioară, contactele de forță normal deschise K_2 sau K_3 au rămas sudate.

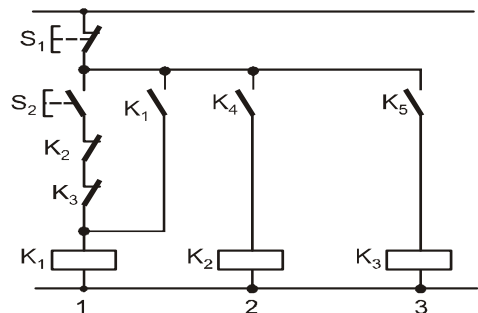


Fig.1.27. Schema de comandă automată a pornirii reostatice în funcție de viteză

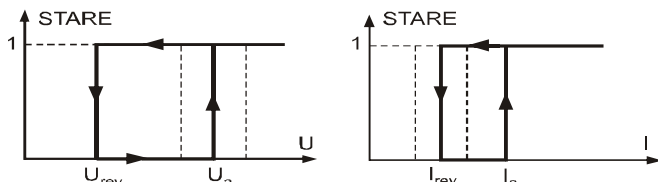


Fig.1.28. Caracteristica statică a releului maximal de tensiune și
releului minimal de curent.

1.7.4. Schema de comandă pentru pornirea automată în funcție de curent

Având în vedere caracteristica statică a releului minimal de curent (fig.1.28) la care valoarea de revenire este reglabilă și garantată precum și evoluția valorii medii a curentului rotoric, rezultă că pentru comanda contactoarelor K_2 și K_3 se impune folosirea contactelor normal închise (fig.1.29) ale releelor

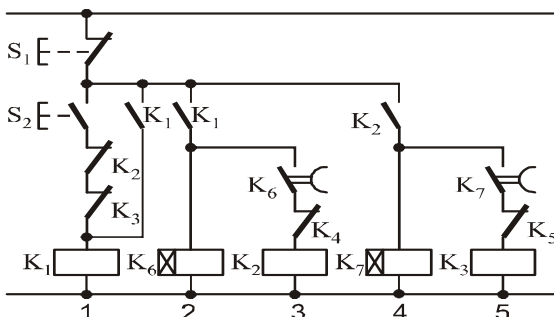


Fig.1.29. Schema de comandă automată a pornirii reostatice în funcție de curent.

minimale de curent. De asemenea, pentru ca circuitele 3 și 5 să fie deschise până la comanda de pornire, se utilizează două relee de timp suplimentare K_6 și K_7 . Temporizarea acestora trebuie reglată astfel încât să fie mai mare decât timpul de anclanșare al releelor de curent și cu mult mai mică decât timpul de revenire al acestora.

1.7.5. Schema de comandă cu microcontroler

Schema de comandă cu microcontroler este identică atât pentru pornirea în funcție de viteză cât și pentru pornirea în funcție de curent, cu condiția ca la intrarea în convertorul analog-numeric CAN (fig.1.30) să fie aplicat un semnal amplificat din aceeași gamă:

2-10mV, 2-10V etc.

Din schema de forță se elimină releele de tensiune sau curent. Se păstrează traductorul de tensiune pentru pornirea în funcție de viteză sau se introduce un singur traductor de curent pentru pornirea în funcție de curent.

Se poate constata ușor că această schemă este identică cu cea de la pornirea stea-triunghi (dacă pornirea se face pe mai multe trepte atunci se utilizează mai multe elemente de execuție) acesta fiind însă un argument pentru extinderea variantelor cu microcontroler pentru comanda automată a acționărilor electromecanice în particular, a instalațiilor electromecanice în general. Cu schema de mai sus se poate asigura atât pornirea în funcție de timp cât și pornirea în funcție de viteză sau curent.

Schema logică pentru pornirea în funcție de curent este prezentată în fig.1.31.

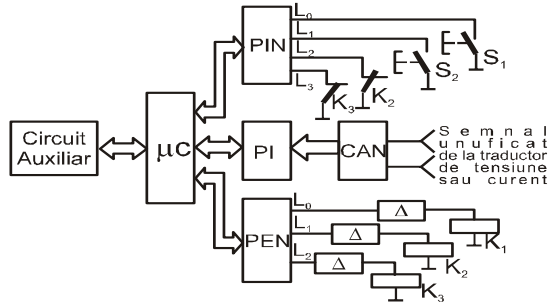


Fig.1.30. Schema de comandă cu microcontroler pentru pornirea reostatică.

Schema logică:

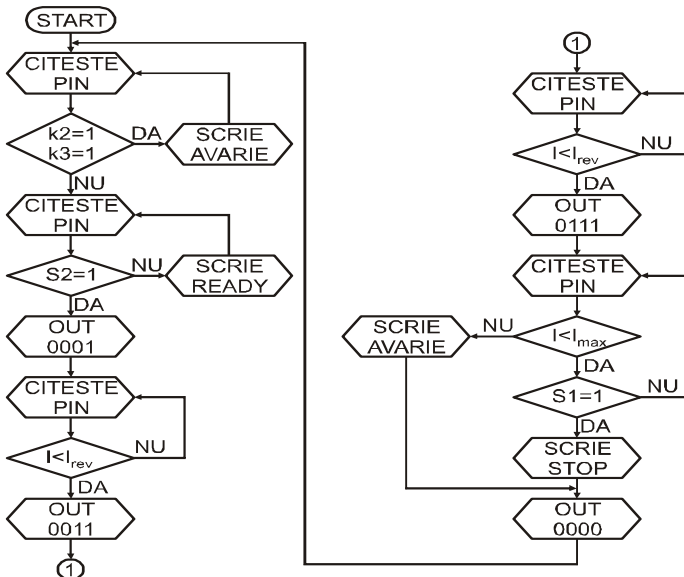


Fig.1.31. Schema logică pentru comanda automată a pornirii reostatice în funcție de curent.

1.8. Comanda automată a acționării cu motor sincron

Deoarece în majoritatea aplicațiilor pornirea motorului sincron se face în asincron, rezultă că schemele de comandă sunt similare. Pentru exemplificare se prezintă schema pentru pornirea în funcție de curent, iar în cadrul aplicației industriale se folosește pornirea în funcție de timp.

1.8.1. Comanda automată a pornirii în funcție de curent a acționării electromecanice cu motor sincron

Schema de forță și comandă (fig.1.32) asigură următoarele funcțiuni:

- cuplarea statorului la rețea prin intermediul contactorului K_1 ;
- conectarea circuitului rotoric pe rezistența de descărcare R_d prin contactul normal închis K_3 ;
- deconectarea rezistenței de descărcare și conectarea circuitului de excitație la sursa de tensiune continuă prin intermediul contactului normal deschis K_3 la comanda primită de la releul minimal de curent K_2 .

Soluția se aplică la acționările cu motoare sincrone de putere medie și înaltă tensiune. Releele maximale de curent și releele termice - pentru protecție - și releul minimal de curent - pentru comandă - se montează în secundarul câte unui transformator de curent.

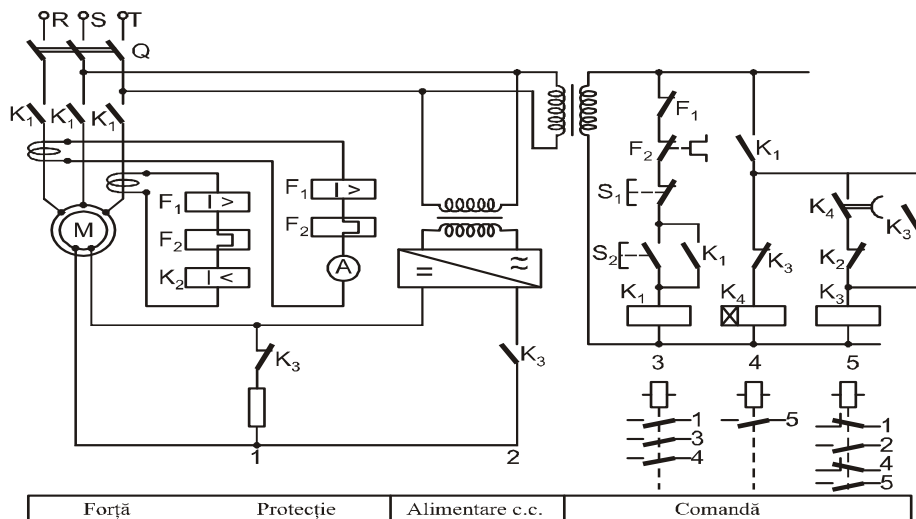


Fig.1.32. Schema de comandă automată a pornirii în funcție de curent a acționării electromecanice cu motor sincron.

1.8.2. Aplicație industrială. Sistem de automatizare a acționării compresoarelor din stațiile de pompare gaze naturale

Sistemul (fig.1.33) este destinat automatizării acționării compresoarelor din stațiile de pompare a gazelor naturale echipate cu compresoare C144M1FU.

Sistemul de automatizare este format dintr-un nucleu de bază MICRON echipat cu microcontroler care asigură automatizarea procesului de pornire/oprire a motorului de antrenare a compresorului și monitorizarea bunei funcționări a acestuia.

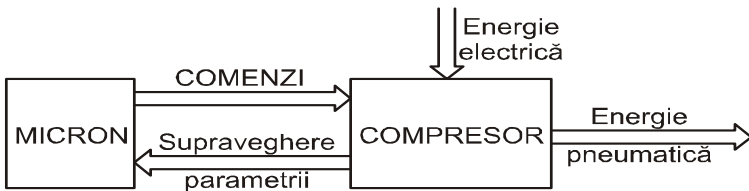


Fig.1.33. Structura sistemului de automatizare.

Partea de forță (fig.1.34) cuprinde motorul electric sincron M, pornit în asincron și motorul asincron de antrenare a pompei de ungere, care are rolul de a asigura preungerea, înaintea pornirii compresorului și post ungerea, după oprirea compresorului.

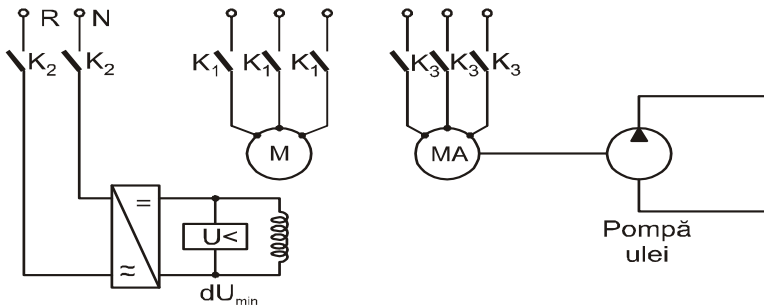


Fig.1.34. Schema de forță.

Procesul tehnologic impune ca:

- pornirea pompei de ulei să fie comandată de operator la începutul unui ciclu, iar apoi de sistemul de automatizare în timpul procesului de transport gaze;
- pornirea motorului de antrenare a compresorului să fie comandată manual, iar oprirea să fie comandată automat dacă nu este îndeplinită una din condițiile de bună funcționare.

Ca urmare, schema de comandă este mixtă (fig.1.35): comandă manuală, supravegherea automată a bunei funcționări.

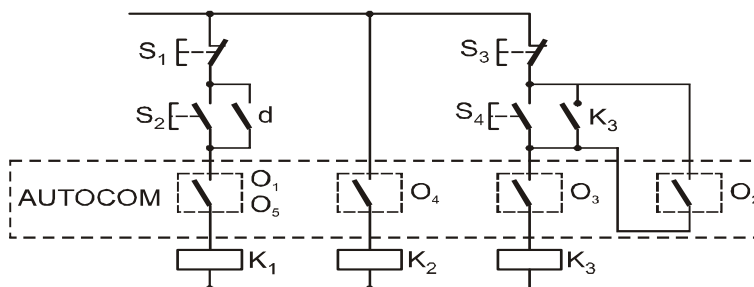


Fig.1.35. Schema de comandă mixtă a părții de forță.

Ținând seama de:

a) mărimile de intrare

- I₁ – Presiunea minimă ulei ungere 1,4 bar
- I₂ – Presiunea minimă ulei ungere 1,8 bar
- I₃ – Presiunea maximă ulei ungere 2,8 bari
- I₄ – Temperatura minimă ulei ungere 15°C
- I₅ – Presiunea maximă gaze refulare treapta II 48 bar
- I₆ – Presiunea minimă aer ventilație 5 mmH₂O
- I₇ – Temperatura maximă lagăr 1,65°C
- I₈ – Temperatura maximă lagăr 2,65°C
- I₉ – Lipsa curgere aer (ventilație forțată)
- I₁₀ – Lipsa curgere apă
- I₁₁ – Confirmare funcționare pompă ulei
- I₁₂ – Confirmare funcționare compresor
- I₁₃ – Confirmare funcționare ventilator
- I₁₄ – Tensiune minimă excitație
- I₁₅ – Blocare volantă
- I₁₆ – Stop sirenă

b) mărimile de ieșire

- O₁ – Comandă oprire compresor
- O₂ – Comandă validare pompă ulei
- O₃ – Comandă pompă ulei
- O₄ – Comandă excitație
- O₅ – Comandă sirenă

S-a conceput schema de comandă cu microcontroler (fig.1.36).

Funcțiuni

Sistemul de automatizare asigură:

1. Verificarea condițiilor de pornire a instalației de comprimare gaze:
 - presiunea uleiului la intrarea în carter este mai mare de 1,4 bari;
 - temperatura uleiului în carter este mai mare de 15°C ;
 - sunt îndeplinite condițiile de protecție antiexplozivă capsulare presurizată: motorul electric sincron este ventilat iar presiunea aerului de presurizare dinamică este mai mare de $5\text{ mmH}_2\text{O}$;
 - volantul compresorului nu are piedica mecanică pusă.
2. Validează pornirea compresorului dacă sunt îndeplinite condițiile de pornire.
3. Monitorizează condițiile de bună funcționare a instalației de comprimare gaze:
 - temperatura lagărelor de palier este mai mică de 65°C ;
 - presiunea de refulare a gazelor în treapta a II-a este sub 48 bari;
 - tensiunea de alimentare a excitației motorului sincron este peste valoarea minimă;
 - ventilatorul de presurizare, pentru asigurarea protecției antiexplozive funcționează normal;
 - presiunea uleiului de ungere este mai mare de 1,8 bari și mai mică de 2,8 bari.
4. Comanda automată a contactorului de alimentare a motorului pompei de ungere astfel:
 - a) pornit
 - dacă presiunea a scăzut sub 1,8 bari;
 - s-a dat comanda de oprire a compresorului;

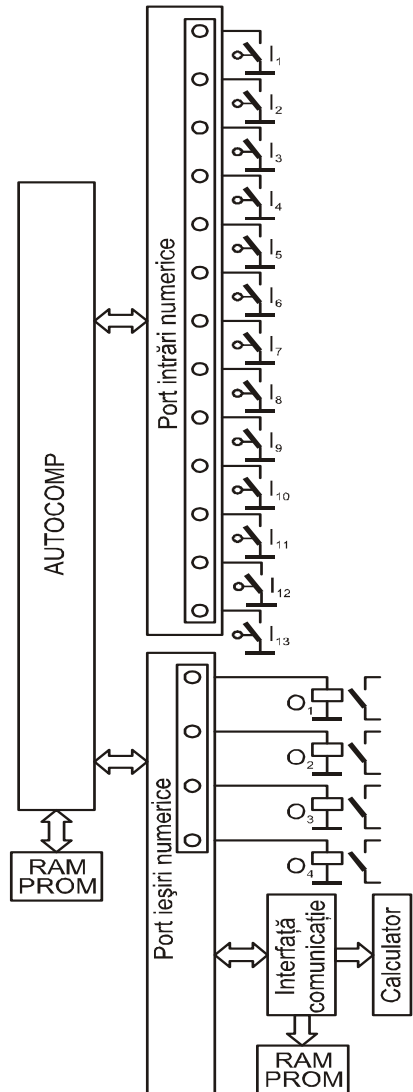
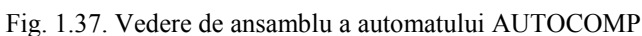


Fig.1.36. Schema de comandă cu microcontroler.

- Local:



1.9. Alegerea elementelor de alimentare, comandă și de protecție a acționărilor electromecanice

1.9.1. Alegerea secțiunii cablurilor de alimentare a motoarelor electrice de acționare

Pentru alegerea secțiunii cablurilor de alimentare a acționărilor electromecanice dintr-o instalație, trebuie să se stabilească, mai întâi, configurația rețelei (fig.1.38) din care să rezulte lungimea traseelor și modul în care sunt legați consumatorii. În multe aplicații, un cablu electric alimentează mai multe motoare electrice de acționare dar și alți consumatori, spre exemplu lămpi de iluminat, instalații de sudare, etc.

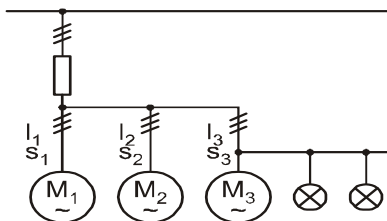


Fig.1.38. Configurația unei rețele de alimentare a acționărilor electromecanice.

Se calculează curentul absorbit de fiecare tip de consumator, astfel:

- a) în cazul motoarelor de antrenare a mașinilor hidraulice volumice, dispozitivelor de strângere, corpurilor de iluminat, se poate considera că puterea cerută rămâne constantă pe toată durata conectării acestora la rețea, iar curentul absorbit se calculează cu relația:

$$I_c = \frac{P_N}{k U_N \cos \varphi},$$

- unde: P_N - puterea nominală a consumatorului;
 U_N - tensiunea nominală;
 $\cos \varphi$ - factorul de putere;
 k - coeficient de fază;
 $k = 1$ pentru rețele de curent continuu și rețele monofazate de curent alternativ;
 $k = \sqrt{3}$ pentru rețele trifazate.

- b) pentru motoarele electrice de antrenare a mașinilor unelte, a liniilor de transfer tehnologic, a roboților, curentul absorbit depinde de regimul de funcționare, iar curentul absorbit se calculează cu relația:

$$I_c = \frac{\lambda_j P_N}{k U_N \eta_j \cos \varphi},$$

unde λ_j este un coeficient de suprasarcină mecanică calculat fie ca raport al puterilor, fie ca raport al curenților:

$$\lambda_j = \frac{P_j}{P_N}; \quad \lambda_j = \frac{I_j}{I_N}; \quad j - \text{regimul de așchiere}; \quad \eta_j - \text{randamentul}$$

- c) pentru transformatoarele de sudare, cuptoarele electrice, curentul se calculează cu relația:

$$I_c = \frac{S_N}{k U_N \eta},$$

unde S_N este puterea aparentă a transformatorului sau cuptorului.

- d) pentru motoarele care antrenează generatoare de sudare, generatoare din grupurile generator-motor sau pentru instalațiile cu redresoare curentul absorbit se calculează cu relația:

$$I_c = \frac{U_j I_j}{k U_N \eta_j \cos \varphi_j},$$

unde: U_j, I_j - tensiunile, respectiv curenții debitați în curent continuu în cele mai dezavantajoase condiții

U_N - tensiunea nominală în c.a.

η_j - randamentul ansamblului.

Dacă toți consumatorii sunt alimentați prin același cablu și funcționează simultan, se calculează curentul total prin însumare algebrică, iar dacă se aplică un coeficient de simultaneitate, subunitar, dependent de categoria consumatorului:

$$I_c = c_1 I_{c1} + \dots + c_n I_{cn}.$$

Cunoscând curentul care circulă prin conductoarele cablului, se alege din tabele secțiunea acestora, în funcție de modul de pozare (în aer, în tub - un singur cablu, mai multe cabluri -, în pământ), în funcție de tipul izolației și materialului conductor (cupru sau aluminiu). De asemenea, este necesară efectuarea unor corecții - indicate, de asemenea, în tabele - dacă temperatura mediului diferă de cea standardizată, respectiv dacă instalația funcționează în regim de scurtă durată sau intermitent.

În final, trebuie îndeplinită condiția:

$$I_c < I_{adm}.$$

Verificări

a) Verificarea densității de curent la pornire se face cu relația:

$$\frac{I_p}{S} \leq j_{adm},$$

unde: I_p - curentul de pornire al motorului

S - secțiunea cablului ales

j_{adm} - densitatea de curent admisibilă în funcție de materialul conductorului

- $j_{adm} = 20 \text{ A/mm}^2$ pentru aluminiu
- $j_{adm} = 30 \text{ A/mm}^2$ pentru cupru

b) Verificarea pierderilor de tensiune

Știind că pierderea de tensiune pe linia cu lungimea l , parcursă de curentul

I este:

$$\Delta U = \sqrt{3} (R \cos\varphi + X \sin\varphi) I l,$$

unde: R - rezistența conductorului pe unitatea de lungime,

X - reactanța conductorului pe unitatea de lungime,

Se verifică dacă:

$$\Delta U \leq \Delta U_{adm}; \quad \Delta U\% \leq \Delta U_{adm}\%$$

$\Delta U_{adm}\% = 10\%$ pentru motoare; $\Delta U_{adm}\% = 8\%$ pentru instalații de iluminat.

1.9.2. Alegerea contactoarelor de alimentare a motoarelor electrice de acționare

Alegerea unui contactor se face în funcție de:

- parametrii electrici ai circuitului alimentat;
- parametrii de lucru;
- condițiile de mediu.

Parametrii electrici se referă la:

- a) tensiunea și curentul de comandă a bobinei contactorului. Alegerea tipului și a valorii tensiunii nominale a bobinei se face în funcție de celelalte elemente ale schemei, astfel încât să se lucreze cu cât mai puține tipuri (c.c. sau c.a. sau valori 12V, 24V, 48V, 110V, 220V, 380V) și în funcție de informațiile cuprinse în cataloagele întreprinderilor producătoare; la alegerea contactelor principale se ține seama de tensiunea nominală și curentul nominal al motorului, iar la alegerea contactelor auxiliare se ține seama de tensiunea din circuitul de comandă și curenții absorbiți de bobinele elementelor de comandă alimentate prin aceste contacte.

- b) felul și valoarea nominală a tensiunii motorului alimentat;
c) puterea sau curentul maxim al motorului.

Parametrii de lucru se referă la:

- regimul de lucru;
- frecvența conectărilor;
- durata conectării;
- locul din schemă (alimentare, scurtcircuitare rezistențe, etc.)

Condițiile de mediu se referă la: temperatură, șocuri, vibrații, praf, condiții de întreținere.

Pentru alegerea contactorului se pornește de la tensiunea și curentul nominal al motorului.

Se alege un contactor având tensiunea de serviciu $U_c > U_N$ motor.

Se calculează curentul echivalent:

$$I_e = \frac{I_N}{k_1},$$

unde: $k_1 = \frac{a}{N_1}$ - coeficient de corecție,

$N_1 = \frac{I_p}{I_N}$ - raportul dintre curentul de pornire și curentul nominal al motorului

$a = 6$ pentru $N_1 > 6$

$a = 2,5$ pentru $2,5 < N_1 < 6$

$a = N_1$ pentru $N_1 < 2,5$

Se alege un contactor al cărui curent nominal este egal sau mai mare decât curentul echivalent I_e .

Se verifică apoi din punct de vedere termic pentru a ține seama de solicitările din perioadele de pornire și frânare.

$$I_e = \sqrt{\frac{I_1^2 t_p + I_2^2 t_f}{t_p + t_f + t_0}} < I_{\text{termic}}$$

unde: I_1 - curentul echivalent de pornire

I_2 - curentul echivalent de frânare $I_1 = \frac{I_p}{k_2}$

$k_2 = 1,7$ pentru $t_p > 5s$

$k_2 = 3,2$ pentru $t_p < 5s$

t_p - timpul de pornire sau suma timpilor de pornire

t_f - timpul de frânare

t_0 - timpul de pauză

I_{termic} - curentul nominal al contactorului

Se verifică apoi la curentul de pornire:

$I_{\text{pcatalog}} > I_{\text{max.pornire}}$
 fiind curentul pe care îl poate închide contactorul prin contactele sale fără ca acestea să se sudeze; este indicat de constructor.

1.9.3. Alegerea și verificarea releelor termice

Se precizează că protecția motoarelor la suprasarcină cu rele termice se poate realiza corect numai dacă acestea funcționează în servicii neîntrerupte S_1 , S_6 , S_7 , S_8 .

Releele termice sunt caracterizate prin curentul de serviciu I_R , care poate fi reglat în plaja $(0,6 \dots 1)I_N$, alegându-se în funcție de curentul nominal I_N al motorului astfel încât $I_R > I_N$. Se calculează coeficientul de reglaj:

$$K = \frac{I_N}{I_R}$$

și se fixează butonul de reglaj în dreptul reperului corespunzător.

Releul termic trebuie să asigure deconectarea motorului astfel:

- după 2 ore, dacă $\frac{I_S}{I_R} = 1,05$,
- în mai puțin de 2 ore, dacă $\frac{I_S}{I_R} = 1,2$,
- în mai puțin de 2 minute, dacă $\frac{I_S}{I_R} = 1,5$,
- după 2 secunde, dacă $\frac{I_S}{I_R} = 6$.

Pentru alegerea și verificarea practică a releelor termice se procedează astfel:

- după alegerea motorului de acționare, se cunoaște curentul nominal al acestuia I_N ;
- se alege un releu termic cu un curent de relaj I_R astfel încât $I_N \in (0,6 \dots 1)I_R$;
- după realizarea instalației se verifică montarea releului termic în poziție corectă (poziție orizontală sau verticală);
- se rotește butonul de reglaj până când indicatorul acestuia este în dreptul valorii curentului nominal sau coeficientului de reglaj K ;
- se pornește motorul asincron și se lasă să funcționeze la sarcină nominală 15..30 minute, în funcție de constanta termică de timp a motorului, după care se crește sarcina cu 50% sau se scoate o siguranță fuzibilă, motorul fiind alimentat în două faze. Releul trebuie să deconecteze în cel mult 2 minute.

Dacă acesta nu declanșează, se rotește butonul de reglaj spre limita inferioară până când releul declanșează.

1.9.4. Alegerea și verificarea siguranțelor fuzibile

Alegerea curentului nominal al siguranței fuzibile se face pe baza caracteristicii de topire a fuzibilului și curba de variație a curentului în timpul pornirii (fig.1.39) astfel încât acestea să nu se intersecteze.

- pentru motoare electrice cu pornire ușoară, care durează 3...10 s

$$I_{Nsig} = \frac{I_p}{2,5} \text{ - pentru siguranțe fuzibile rapide,}$$

$$I_{Nsig} = I_N \text{ - pentru siguranțe fuzibile lente;}$$

- pentru motoare electrice cu pornire grea, care durează 20...40 s, și cu porniri frecvente

$$I_{Nsig} = \frac{I_p}{1,6...2}.$$

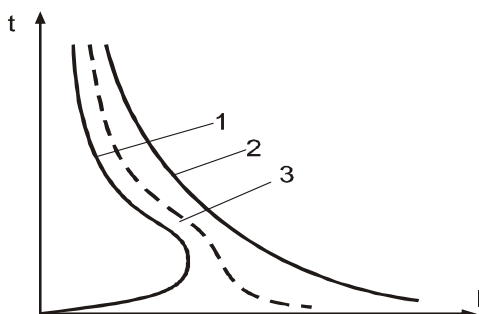


Fig.1.39. Caracteristica timp-curent a unei siguranțe fuzibile
1 - variația curentului la pornirea unui motor electric;
2 - caracteristica unei siguranțe fuzibile lente;
3 - caracteristica unei siguranțe fuzibile rapide.

1.10. Mediu virtual pentru studiul comenzii automate a pornirii stea-triunghi a acționării cu motor asincron

Evoluția rapidă din ultimii ani din domeniul tehnologiei informației face posibilă utilizarea calculatoarelor pentru crearea de medii virtuale în scopul adaptării educației ingineresti la facilitățile oferite de acestea. Pentru aceasta sunt necesare pachete software dedicate, care să punteze și să faciliteze înțelegerea elementelor necesare formării profesionale a inginerilor.

Un exemplu de program care creează medii virtuale de studiu este „Comanda pornirii automate stea-triunghi 2.0”. Acesta este o aplicație ce face parte dintr-un pachet software didactic dedicat sistemelor de comandă automată a acționărilor electromecanice (porniri, reglaje de viteză, frânări), fiind dezvoltată în mediul de programare Visual Basic 6.0 și putând fi utilizată pe orice calculator compatibil IBM utilizând sistemul de operare Microsoft Windows. Pentru a rula sunt necesare cel puțin următoarele resurse hardware: procesor 80486DX2, 16 MB memorie RAM, 4 MB spațiu pe harddisk, placă video VGA cu o rezoluție de 800x600 pixeli, mouse.

Instalarea se face rulând fișierul setup.exe din kit-ul de instalare ce se află disponibil în format zip și la adresa <http://www.em.ucv.ro>. Rutina de instalare va executa operația de copiere în calculator a fișierelor necesare aplicației, iar în StartMenu-Programs va crea un shortcut având un nume sugestiv cum este de exemplu „Pornirea stea-triunghi” utilizat pentru lansarea mediului virtual de simulare.

La lansare, pe perioada încărcării și inițializării aplicației, pe ecran va apărea o imagine introductivă urmată apoi de afișarea ferestrei principale a programului. Aceasta conține informații sugestive despre program, iar la partea superioară poate fi văzută bara de meniuri ale căror nume sunt alese astfel încât să le indice destinația.

„Comanda pornirii automate stea-triunghi” permite urmărirea în mediul virtual a funcționării unei scheme de comandă realizată în logică cablată cu contacte și relee, precum și a uneia în logică flexibilă, mai exact a unui sistem de dezvoltare cu microcontroler. Toate evenimentele (închiderea sau deschiderea contactelor, comutarea ieșirilor digitale, etc.) din schemă sunt explicate prin intermediul unei ferestre de explicații. În acest mod, se pot face comparații între cele două structuri de comandă automată, identificându-se avantajele și dezavantajele fiecăreia.

Se lucrează pe schema de comandă clasică (fig.1.40), iar din bara de meniuri (fig.1.41) se selectează varianta de lucru.

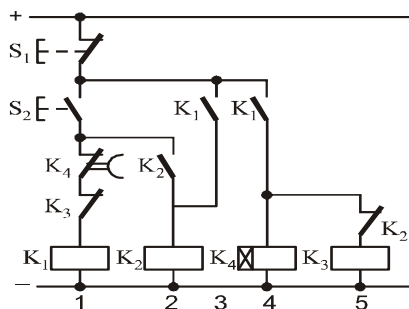


Fig.1.40. Schema de comandă.

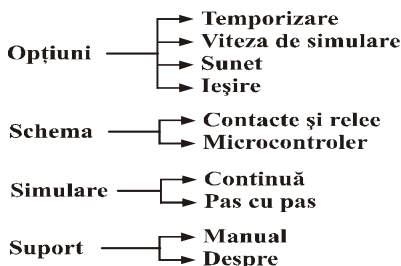


Fig.1.41. Structura meniului.

Din meniul *Opțiuni*, prin intermediul butonului *Temporizare*, utilizatorul are acces la selectarea temporizării releului de timp K_4 din circuitul 4 (fig.1.40) care poate lua valori de la 0 la 10000 milisecunde, valoarea implicită fiind de 3000 milisecunde. Acest lucru se realizează introducând valoarea dorită, care trebuie să fie număr întreg pozitiv, în căsuța de dialog.

Tot din acest meniu se pot valida sau inhiba efectele sonore generate de fiecare etapă a simulării prin activarea, respectiv dezactivarea opțiunii *Sunet*. Aceste efecte constau în niște sunete în difuzorul calculatorului în cazul în care acesta nu are instalată o placă de sunet. În prezența unei astfel de plăci se va auzi sunetul definit la *Default sound* în sistemul de operare Windows sau se poate defini un alt sunet pentru acest eveniment.

Același meniu conține și butonul de părăsire a mediului virtual (*Ieșire*).

Pentru a avea un control permanent asupra timpului, în partea de sus a ferestrei este afișat, alături de titlul ferestrei, un ceas care indică ora sistemului pe care rulează programul.

Viteza de simulare constituie un alt parametru care poate fi configurat din același meniu *Opțiuni*. Prin intermediul acesteia se stabilește timpul dintre două etape succesive ale simulării. Acest lucru este util pentru a urmări mai ușor explicațiile și evenimentele petrecute în schemă. Implicit, această valoare este setată la o secundă, putând fi mărită la 5 secunde prin intermediul ferestrei care apare pe ecran (fig.1.42).

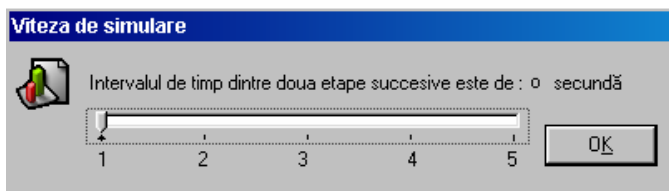


Fig.1.42. Setarea vitezei de simulare

Meniul *Schema* oferă posibilitatea alegerii uneia dintre scheme: cu contacte și rele sau cu microcontroler. Prin selectarea celei cu contacte și rele se afișează schema în starea normală (fig.1.43).

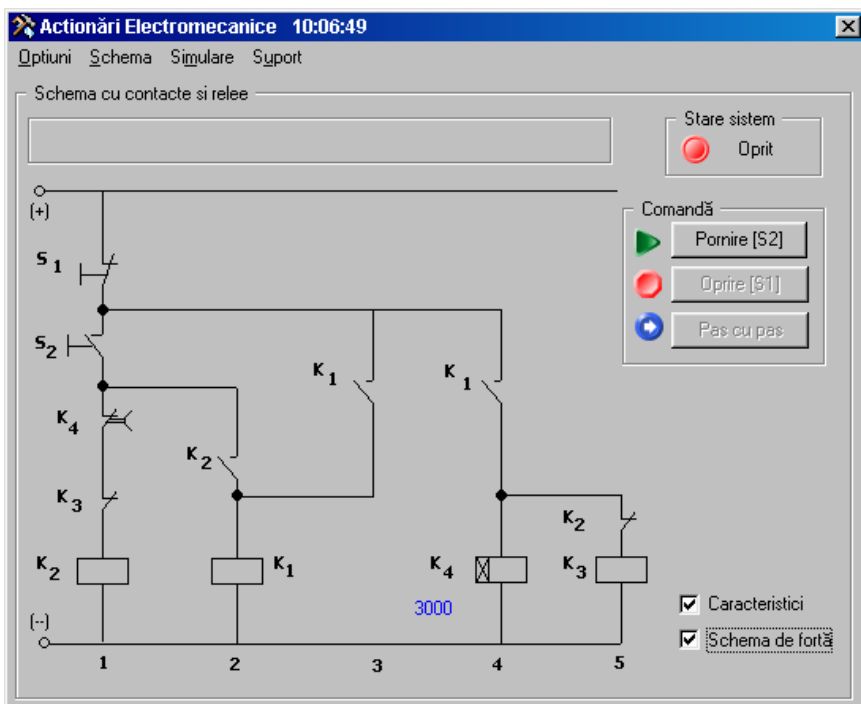


Fig. 1.43. Fereastra de dialog pentru studiul schemei de contacte și rele

Butonul *Pornire* are rolul de a pune în funcțiune schema la simularea continuă, care poate fi oprită prin apăsarea butonului *Oprire*. Acest buton are și rol de resetare a sistemului, ceea ce conduce la aducerea tuturor elementelor din schemă în poziția inițială.

În colțul din dreapta jos sunt prezente două căsuțe de bifare: una pentru afișarea ferestrei conținând schema de forță (fig.1.44), iar cea de a doua pentru afișarea caracteristicilor curentului și cuplului și pe care se poate urmări evoluția punctului de funcționare (fig.1.45).

Lângă contactul K_4 (fig.1.43) este afișată valoarea aleasă pentru temporizare, valoare care în momentul începerii funcționării schemei este decremenată până la zero.

Alegerea celui de-al doilea tip de schemă conduce la apariția structurii cu microcontroler (fig.1.46).

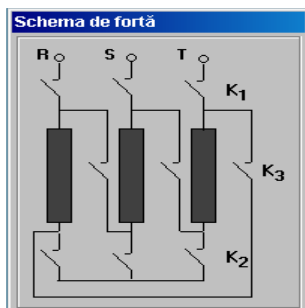


Fig. 1.44. Schema de forță.

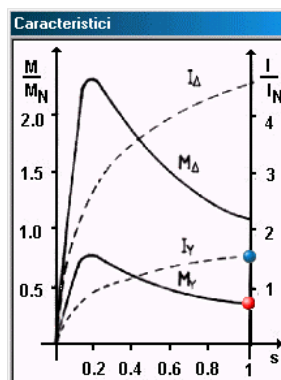


Fig. 1.45. Caracteristicile de funcționare

Această fereastră conține schema bloc a unui sistem de comandă cu microcontroler în care sunt evidențiate porturile de intrare/ieșire și mărimile de intrare și cele de comandă aferente. Și aici sunt prezente blocurile de indicare a stării sistemului și de control al simulării.

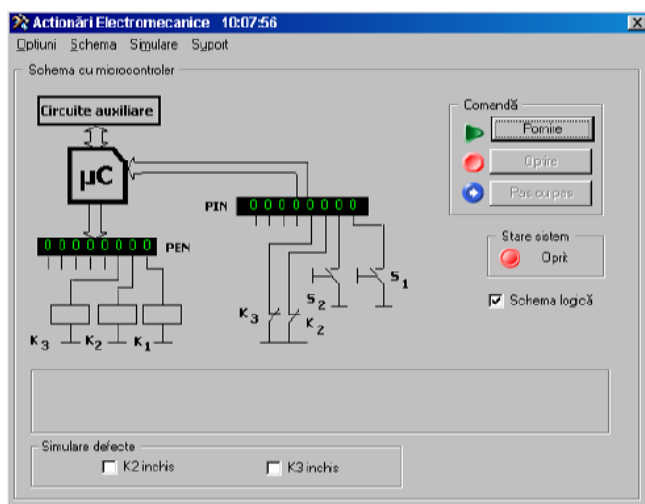


Fig. 1.46. Schema cu microcontroler

În partea inferioară a ferestrei (ca și la schema cu contacte și relee) se află o zonă de afișare a explicațiilor privind etapele simulării și funcționarea sistemului. Sub această zonă sunt amplasate două căsuțe de bifare cu ajutorul cărora se pot simula defecte ce apar în schemele cu contacte și relee, cum ar fi sudarea contactelor corespunzătoare conexiunilor stea sau triunghi, situație în care sistemul trebuie să ia anumite decizii.

Programul rulat de microcontroler este realizat după un algoritm care este sugerat în fereastra ce apare prin bifarea căsuței *Schema logică* (fig.1.47).

În timpul execuției programului întocmit pe baza acestui algoritm, se pot urmări stările celor două porturi de intrare/ieșire și a mărimilor respective, iar instrucțiunea în curs de executare își schimbă culoarea, efectul său fiind detaliat în fereastra de explicații.

În meniul *Support* sunt oferite informații despre program, modul de utilizare, precum și noțiuni teoretice privind pornirea stea-triunghi a acționării cu motor asincron. Tot aici sunt prezentate simbolurile utilizate în schemele clasice cu contacte și relee.

Atât în schema cu contacte și relee cât și în cea cu microcontroler, prin staționarea mouse-ului deasupra unui element din schemă se obțin informații despre acesta prin apariția unor etichete explicative.

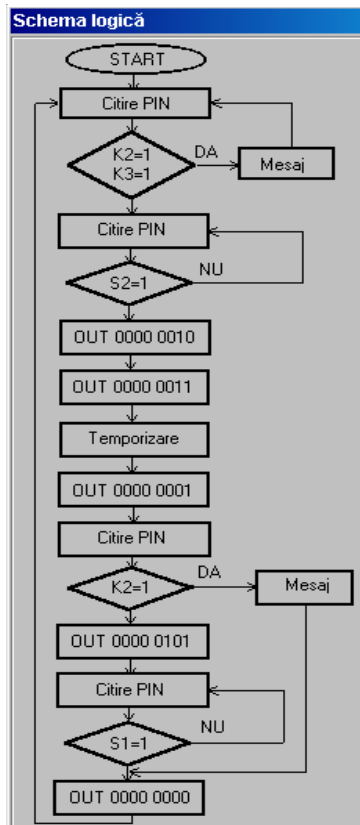


Fig.1.47. Schema logică

2. ALEGEREA SISTEMELOR AUTOMATE DE ACȚIONARE ELECTROMECHANICĂ

2.1. Soluții generale

Un sistem de acționare electromecanică se compune din acționarea clasică și o sursă de alimentare comandabilă.

Rolul sistemelor de acționare electromecanică este de a permite reglarea vitezei mașinii de lucru în scopul adaptării acesteia la procesul tehnologic realizat sau asigurarea unei poziționări impuse. Deși reglarea vitezei mașinii de lucru se poate realiza și prin intermediul mecanismului de transmisie (fig.2.1) această metodă mult și divers utilizată până nu de mult are mai multe dezavantaje:

- puterea transmisă este limitată;
- pierderile sunt relativ importante;
- posibilitățile de reglaj sunt reduse;
- cheltuielile de întreținere sunt ridicate;
- nivelul de zgomot ridicat;
- dimensiuni de gabarit mari.

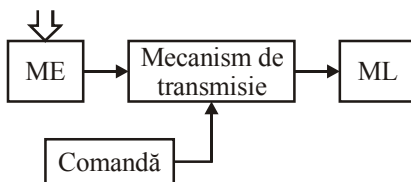


Fig.2.1. Structura acționării electromecanice cu mecanism de transmisie comandabil

Variantele actuale fac apel din ce în ce mai mult (fig.2.2) la convertoare statice: redresoare comandate, variatoare de tensiune continuă, variatoare de tensiune alternativă,

convertoare statice de tensiune și frecvență care asigură în plus accelerații și decelerații impuse, inclusiv de frânare controlată. Și în acest domeniu se poate vorbi de o evoluție istorică: la început s-au dezvoltat sistemele de acționare cu motoare de curent continuu și redresoare comandate, iar în prezent câștigă din ce în ce mai mult "teren" cele cu motoare asincrone și convertoare statice.

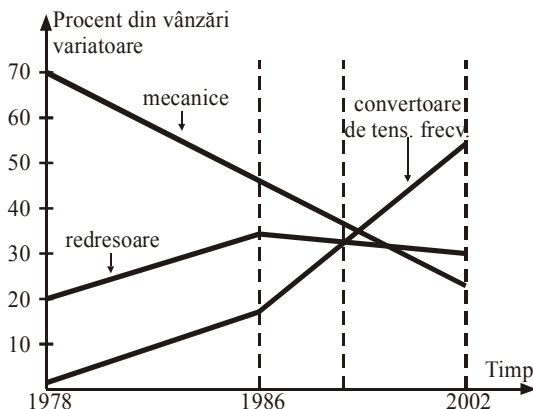


Fig.2.2. Evoluția pieței în domeniul sistemelor de acționare electromecanică.

Această evoluție a fost posibilă ca efect al realizărilor din domeniile:

- dispozitive semiconductoare: tiristoare, tranzistoare de toate tipurile;
- microelectronică, domeniu care a permis realizarea de microcontrolere din ce în ce mai performante.

Deși în teorie și practică se întâlnește o mulțime impresionantă de variante principale și constructive, se poate face o sinteză a acestora, rezultând o structură generală compusă din trei părți principale (fig.2.3):

- partea de forță;
- partea de comandă;
- partea de interfață care asigură culegerea informațiilor din sistemul de acționare și comunicarea cu operatorul uman.

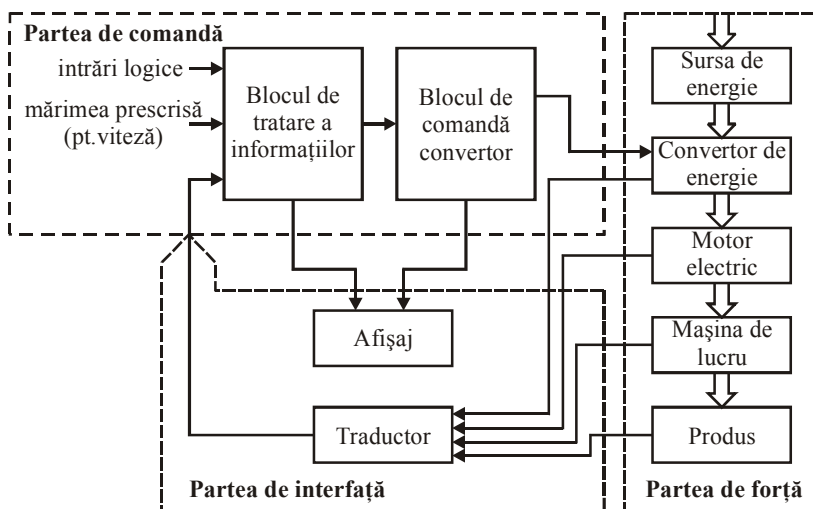


Fig.2.3. Structura generală a unui sistem de acționare electromecanică cu convertoare statice.

Partea de forță cuprinde:

- a) sursa de energie - rețeaua electrică industrială sau locală de curent alternativ trifazată, monofazată sau de curent continuu, baterie de acumulatori, motor termic;
- b) convertorul de energie: redresor, variator de tensiune continuă, variator de tensiune alternativă, invertor, cicloconvertor, convertor static de tensiune și frecvență, generator sincron, generator de curent continuu;
- c) motorul electric: motor de curent continuu cu excitație separată sau serie, motor asincron, motor sincron, motor liniar;
- d) mașina de lucru, cuplată direct la arborele motorului sau prin intermediul unui mecanism de transmisie.

Partea de comandă se compune din:

- a) blocul de comandă al convertorului care cuprinde elemente de separare galvanică între partea de forță a convertorului și partea de curenți slabi. În plus, în funcție de tipul convertorului static, mai cuprinde:
- un dispozitiv de comandă pe grilă în cazul redresoarelor comandate și al variatoarelor de tensiune alternativă, care are rolul de a furniza un semnal de comandă a tiristorului sincron cu tensiunea alternativă aplicată și în concordanță cu mărimea de conducere (fig.2.4);
 - un generator de impulsuri și două formatoare de impulsuri în cazul variatoarelor de tensiune continuă, care au rolul de a regla factorul de umplere al semnalului de comandă în concordanță cu mărimea de conducere (fig.2.5);

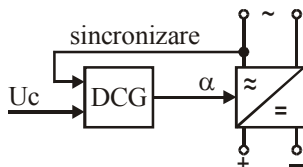


Fig.2.4. Explicativă privind rolul dispozitivului de comandă pe grilă.

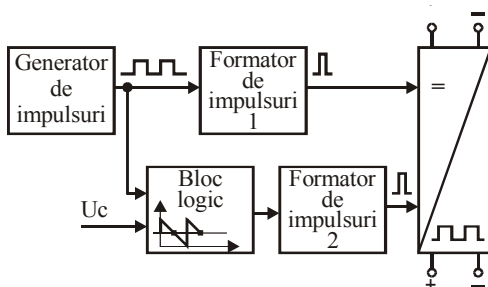


Fig.2.5. Explicativă privind blocul de comandă al unui variator de tensiune continuă.

- un distribuitor al impulsurilor de comandă a dispozitivelor semiconductoare din structura inverterului, în cazul inverteoarelor sau convertoarelor statice de tensiune și frecvență (fig.2.6).

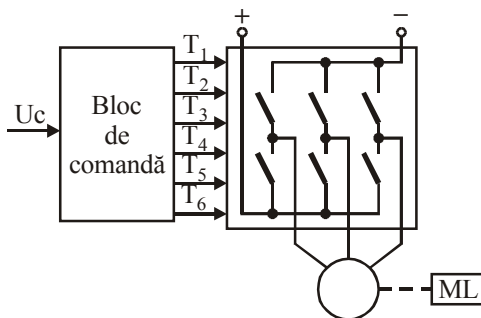


Fig.2.6. Explicativă privind blocul de comandă al unui inverter.

- b) blocul de tratare a informațiilor poate avea o structură analogică și este compus din regulatoare, PI (proporțional integratoare) (fig.2.7), sau poate fi realizat cu unul sau mai multe microcontrolere (microprocesoare).

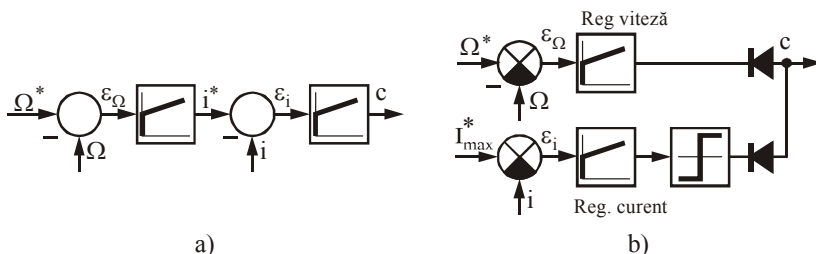


Fig.2.7. Explicativă privind structura analogică a blocului de tratare a informațiilor:

a) conectarea reguletoarelor în cascadă

b) conectarea paralel a reguletoarelor

Ω^* - viteza impusă;

Ω - viteza măsurată;

i^* - curentul impus;

i - curentul real;

c - mărimea de conducere (mărimea de ieșire din regulator).

Intrările logice furnizează informații de tipul:

- start - stop;
- mers înainte, mers înapoi;
- interblocaje cu alte echipamente;
- apariție defecte (scurtcircuite, supratemperaturi, subtensiuni, lipsă tensiune etc.).

Utilizarea sistemelor automate de acțiune electromecanică este întâlnită începând de la cele mai simple acțiuni și procese (mașini de găurit manuale, mașini de spălat) și până la cele mai complexe, cum sunt cele din tracțiunea electrică:

- mașini unelte, roboți, șanduri de încercare a mașinilor în fluxul de fabricație sau pentru testarea prototipurilor;
- mașini din industria textilă, de fabricare a hârtiei, laminoare;
- mori de ciment, malaxoare, dozatoare, centrifuge, extrudere;
- transportoare cu bandă, instalații de ridicat și transportat (poduri rulante, ascensoare), excavatoare;
- propulsoarele navelor maritime și fluviale, tracțiune electrică (locomotive feroviare, tramvaie, metrou, teleferice, autovehicule electrice);
- variante de pompe, ventilatoare, compresoare.

2.2. Criterii de alegere a unui sistem de acționare electromecanică

Adoptarea soluției de reglare a vitezei și alegerea unui sistem de acționare electromecanică se face după un complex de criterii, cu pondere diferită de la caz la caz. Deși elaborarea unui algoritm unic general valabil (fig. 2.8) este, în același timp ”dificilă și riscantă, se propune următorul set de criterii:

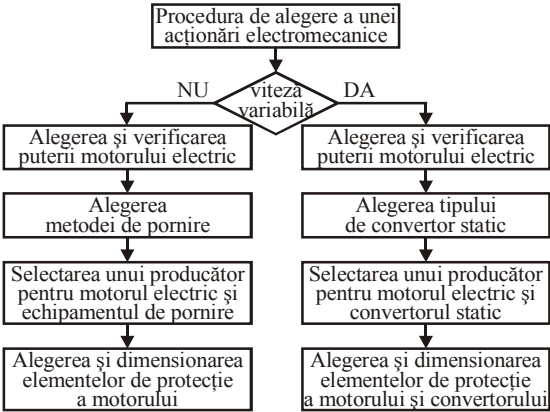


Fig.2.8. Schema logică generală pentru alegerea elementelor unei acționări electromecanice.

Etape 1. Analiza necesităților beneficiarului, particularitățile aplicației:

Experiența a demonstrat că la conceperea și realizarea unui sistem de acționare electromecanică trebuie să se pornească de la o analiză a aplicației (fig.2.9), de la necesitățile formulate de beneficiar, necesități însă corectate de specialiști.

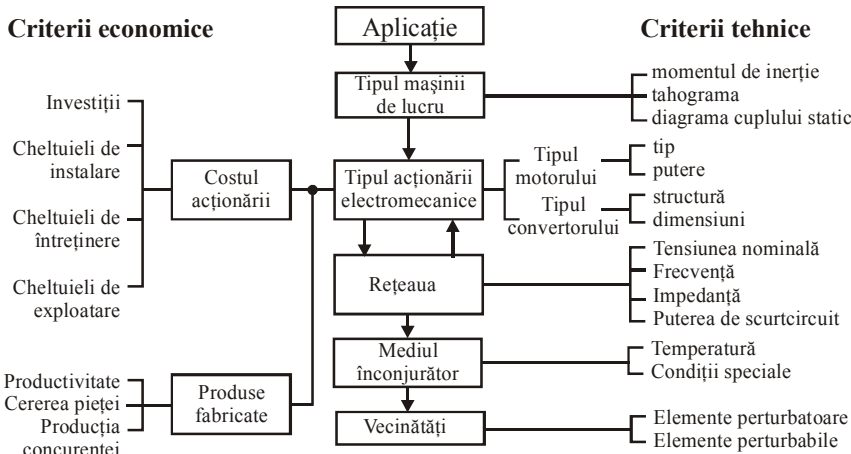


Fig.2.9. Elementele pentru adoptarea soluției de reglare a vitezei

În acest scop se propune tratarea următoarelor aspecte:

- aplicația se referă la modernizarea unei acționări existente sau se referă la o instalație nouă;
- aplicația este independentă sau se încadrează într-un proces de producție;
- dacă aplicația face parte dintr-o linie tehnologică, cum este ea inclusă din punct de vedere funcțional: serial sau paralel?;
- care sunt riscurile financiare determinate de nefuncționarea aplicației analizate;
- care este scopul reglării vitezei:
 - optimizarea procesului tehnologic;
 - economie de energie la pornire;
 - economie de energie în timpul funcționării;
 - reducerea cheltuielilor de producție;
- care este gama de reglare a vitezei, care sunt vitezele intermediare fixe; pentru fiecare viteză, care este puterea (eventual cuplul) cerut de mașina de lucru;
- dacă se impune trecerea motorului în regim de frână;
- beneficiarul dispune și de alte sisteme de acționare? De ce tip sunt și cum se asigură întreținerea acestora?
- care este politica beneficiarului privind calificarea personalului propriu de întreținere;
- cum se asigură sau se va asigura comanda aplicației: manual, automat, centralizat?
- ce alte restricții sau condiții specifice trebuie respectate: mediu coroziv, mediu umed, cu praf higroscopic, cu praf exploziv, vibrații, modul de răcire al motorului (fig.2.10);
- calificarea personalului de exploatare, periodicitatea reviziilor efectuate la instalațiile deservite de sistemul de acționare.

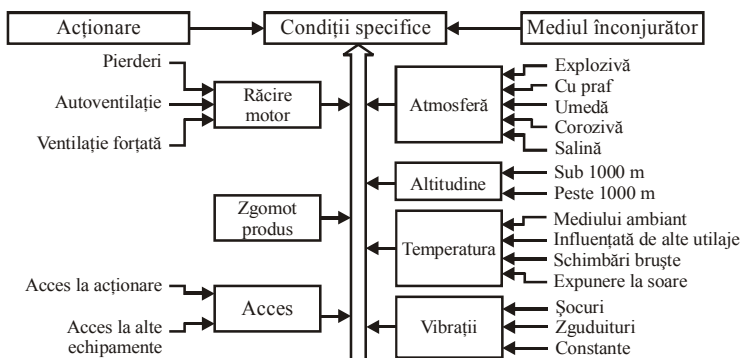


Fig.2.10. Elemente de analiză a condițiilor specifice.

Etapa 2. Analiza procesului tehnologic.

Analiza procesului tehnologic (fig.2.11) oferă informații pentru alegerea motorului și a structurii sistemului.

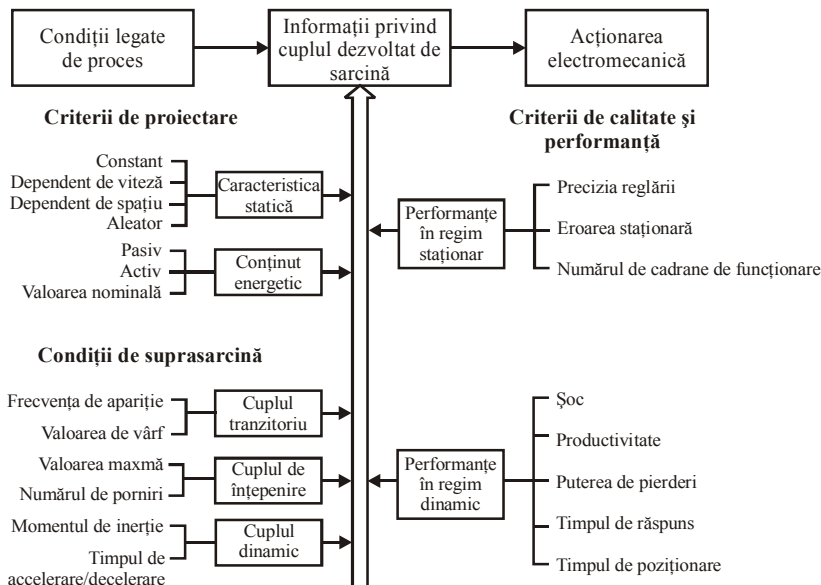


Fig.2.11. Elemente de analiză a procesului tehnologic

Din analiza caracteristicilor statice ale mașinii de lucru (fig.2.12) va rezulta, în principal, cuplul pe care trebuie să-l dezvolte sistemul de acționare la pornire și condiția de invarianță a cuplului ($M=ct.$, $P=var.$) sau puterii ($P=ct.$, $M=var.$) la reglarea vitezei.

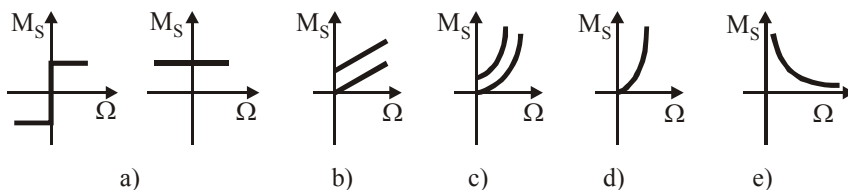


Fig.2.12. Recapitulativă privind caracteristicile statice de forma $M_s = f(\Omega)$

- a) constant; b) proporțional cu viteza; c) proporțional cu pătratul vitezei; d) proporțional cu viteza la cub; e) invers proporțional cu viteza.

Etapa 3. Analiza rețelei electrice primare sau sursei de energie electrică primară (fig.2.13).

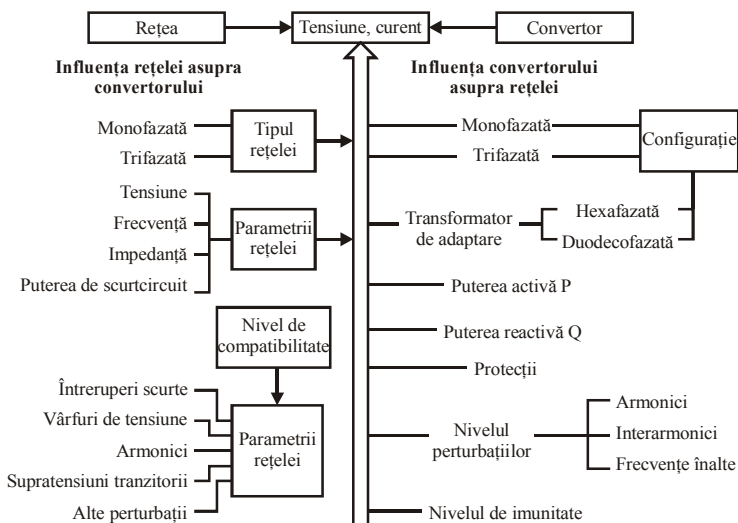


Fig.2.13 Elemente de analiză a rețelei electrice.

Aceasta poate fi:

- rețea trifazăată de curent alternativ;
- rețea monofazăată de curent alternativ;
- rețea de curent continuu;
- baterie de acumulatori.

Pentru o rețea de curent alternativ mai trebuie cunoscut:

- puterea de scurtcircuit a rețelei în scopul calculării căderii de tensiune provocată de pornirea directă a motorului din aplicația analizată sau de pornirea directă a altor motoare cuplate la aceeași rețea.

$$\Delta U = \frac{S_p}{S_{SC} + S_p} U_N \quad (2.1)$$

unde: U_N - tensiunea nominală a rețelei;

S_{SC} - puterea de scurtcircuit a rețelei;

S_p - puterea de pornire directă a unui motor asincron;

$$S_p = \frac{P_N}{I_N \cdot \eta_N \cdot \cos \phi_N} \cdot I_p \quad (2.2)$$

I_p - curentul de pornire directă indicat în catalogul motorului.

- simetria rețelei și regimul de tratare a neutrului;

- numărul decuplărilor și natura acestora;
- limitele de variație a tensiunii;
- caracteristicile supratensiunilor;
- conținutul de armonici;
- existența unor consumatori care pot fi influențați de armonicile de tensiune sau curent.

Etape 4. Alegerea puterii motorului electric alimentat de convertorul static din sistem.

În cazul în care se folosește motorul deja existent, se recomandă următoarea analiză:

- a) motorul existent este de curent continuu: să se facă o analiză tehnică, economică privind înlocuirea cu un motor de curent alternativ;
- b) motorul existent este asincron: să se măsoare puterea consumată în condițiile de încărcare cele mai grele; dacă motorul este încărcat sub $0,6 I_N$ se va face o nouă alegere; dacă este încărcat peste $0,6 I_N$, se va ține seama de încălzirea acestuia în condițiile funcționării la viteze reduse și existenței armonicilor de curent și tensiune.

În cazul în care aplicația este integral nouă, alegerea motorului electric se face după algoritmul cunoscut.

Etape 5. Stabilirea numărului de cadrane de funcționare în planul $M0\Omega$

Numărul de cadrane de funcționare în planul $M0\Omega$ depinde de necesitatea reversării sensului de rotație a motorului, respectiv de natura cuplului static.

Se pot identifica următoarele cazuri:

- funcționarea într-un singur cadran (fig.2.14.a) este obișnuită pentru majoritatea acționărilor, nu se impune reversarea sensului de rotație: problemele care trebuie rezolvate sunt legate de pornirea și reglarea vitezei, energia cerută din rețea și transferată spre mașina de lucru;
- funcționarea în două cadrane în regim de antrenare (fig.2.14.b); reversarea sensului de rotație se face din repaos, iar oprirea se face, dacă este necesar, prin mijloace mecanice;
- funcționarea în două cadrane, într-unul în regim de antrenare și în al doilea în regim de frână electromagnetică; se pot întâlni mai multe cazuri:

a) funcționarea în cadranul I în regim de antrenare și funcționarea în cadranul IV în regim de frână (fig.2.14.c); inversarea sensului de rotație se face sub acțiunea cuplului static (instalații de ridicat) energia potențială în câmp gravitațional terestru circulând dinspre mașina de lucru spre rețeaua de energie primară; deci convertorul trebuie să fie de tip bidirecțional (redresor-invertor);

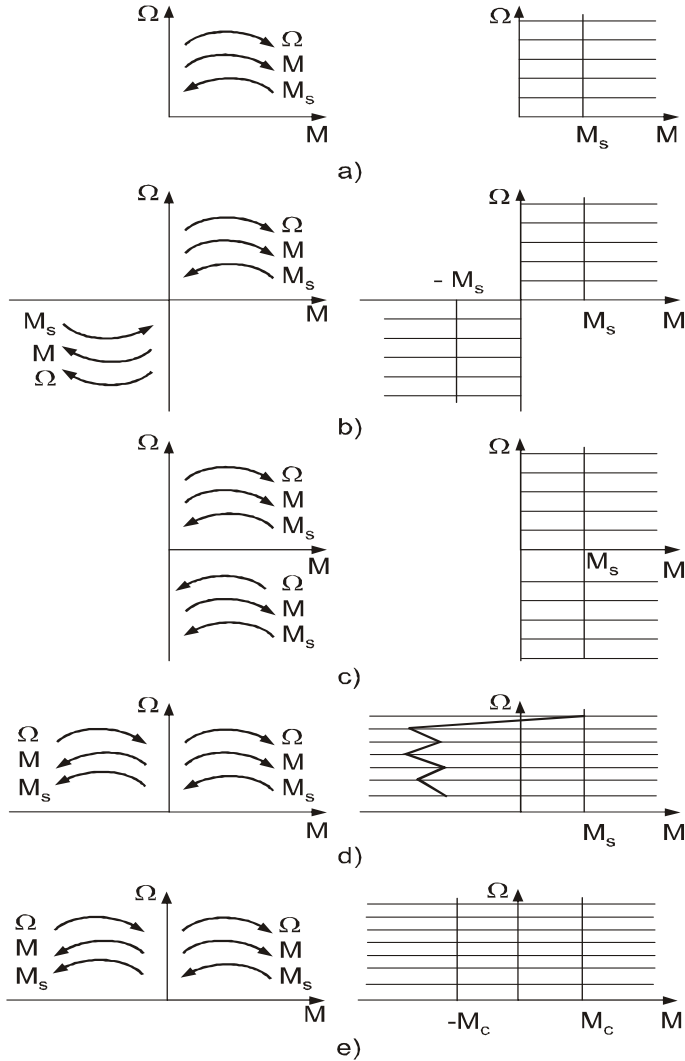


Fig.2.14. Explicativă pentru stabilirea numărului de cadrane de funcționare.

b) funcționarea în cadranul I în regim de antrenare și funcționarea în cadranul II, în regim de frână, cazul cuplurilor statice pasive (fig.2.14.d), energia cinetică a mașinii de lucru circulă spre rețeaua de energie primară, deci convertorul trebuie să fie de tip bidirecțional; sistemul funcționează numai în regim tranzitoriu

determinat fie de reducerea treptată a mărimii prescrise fie de preluarea unui obiect cu viteză mare care trebuie frânat;

c) funcționarea în cadrantul I în regim de antrenare și în cadrantul II în regim de frână, cazul cuplurilor statice care întrețin mișcarea (vehicul de tracțiune la urcarea unei rampe și coborârea unei pante) (fig.2.14.e). Energia potențială în câmp gravitațional terestru circulă spre rețeaua de energie primară, deci convertorul trebuie să fie bidirecțional; sistemul poate să funcționeze și în regim staționar.

- funcționarea în patru cadrane, rezultă prin combinarea cazurilor de mai sus.

Etape 6. Stabilirea frecvenței comenzilor de start-stop, scopul acestora și stabilirea frecvenței reversărilor de sens.

Există aplicații (ex: mașini de bobinat, mașini din industria alimentară de umplut membrane) care necesită oprirea procesului pentru retușuri efectuate de operator; experiența a dovedit că oprirea mașinii de lucru trebuie să se facă cu ajutorul unui ambreiaj mecanic sau cuplaj electromagnetic.

Etape 7. Stabilirea gamei în care trebuie reglată viteza și sensul reglajului.

Aici trebuie precizat cuplul cerut la viteza maximă și care va fi încălzirea motorului la viteză minimă. De regulă sistemul de acționare, prin convertorul static inclus, trebuie să asigure o gamă de reglaj (raportul dintre viteza maximă și viteza minimă pentru aceeași caracteristică statică a mașinii de lucru) mai mare decât cea impusă de mașina de lucru. Pentru stabilirea sensului reglajului se procedează astfel (fig.2.15):

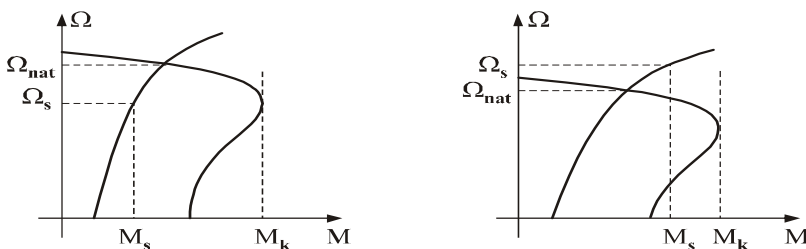


Fig.2.15. Explicativă privind sensul reglajului.

- se consideră cunoscute c.m.n. a motorului și caracteristica statică a mașinii de lucru;
- se consideră cunoscute vitezele de funcționare staționară Ω_s ; se identifică cea mai mare viteză Ω_{max} a mașinii de lucru transpusă la arborele motorului (fig.2.16);

- se calculează viteza corespunzătoare cuplului static pe c.m.n. Ω_{nat} , dacă $\Omega_{max} > \Omega_{nat}$ se impune un reglaj bizonal.

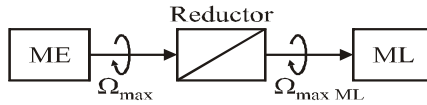


Fig.2.16. Explicativă privind viteza maximă.

Etapa 8. Stabilirea preciziei reglării.

Precizia reglării (fig.2.17) indică necesitatea menținerii vitezei impuse în prezența variației cuplului static, a tensiunii rețelei de alimentare, a temperaturii ambiante, a încălzirii motorului etc. Se definesc:

-precizia statică p_s

$$p_s = \frac{\varepsilon_s}{\Omega_s} = \frac{\omega - \Omega_s}{\Omega_s}; \quad (2.3)$$

-precizia dinamică

$$p_d = \frac{\varepsilon_{max}}{\Omega_s} = \frac{\omega_{max} - \Omega_s}{\Omega_s}; \quad (2.4)$$

În funcție de precizia impusă sistemului, acesta poate să funcționeze în circuit deschis sau în circuit închis.

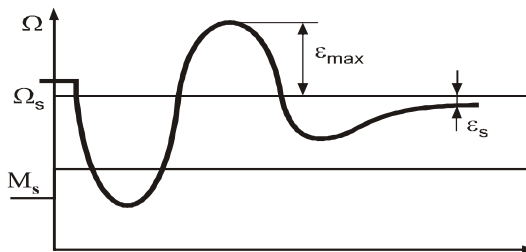


Fig.2.17. Explicativă pentru precizia reglării.

Etapa 9. Alegerea convertorului:

Această etapă este parcursă în două secvențe:

- a) alegerea convertorului după destinația funcțională și ținând seama de tipul constructiv al motorului electric (fig.2.18);

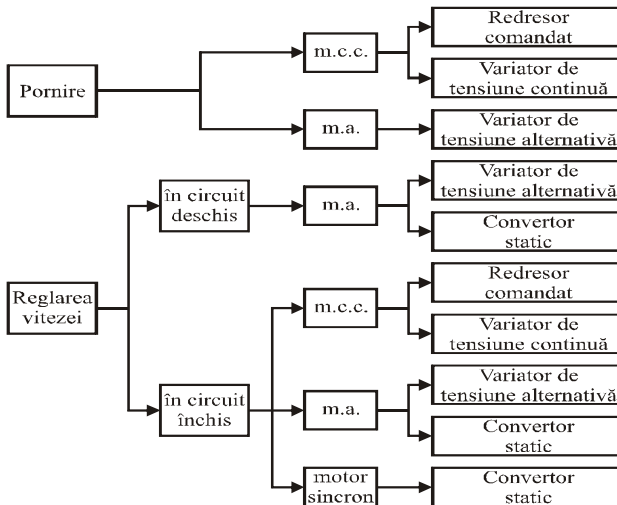


Fig.2.18. Alegerea convertorului după destinație

b) alegerea convertorului de tensiune și frecvență după tipodimensiune.

Cataloagele fabricanților de convertoare oferă informații privind:

- tensiunea nominală de intrare U_{IN} [V];
- frecvența nominală de intrare f_{IN} [Hz];
- tensiunea de ieșire ca procent din tensiunea de intrare (ex. 0...100% U_{IN});
- curentul de ieșire nominal I_N [A];
- curentul de ieșire maxim I_{Nmax} [A];
- puterea aparentă nominală S_N [kVA];
- puterea aparentă maximă S_{max} [kVA] și timpul cât poate fi furnizată;
- puterea activă nominală P_N [kW];
- plaja în care poate fi modificată frecvența de ieșire [Hz];
- timpul de creștere (rampa) a frecvenței până la frecvența nominală;
- alte informații constructive.

Pe baza acestor informații se alege un convertor pentru care:

$$P_{Nconv} > P_{Nmotor}$$

$$U_{Nconv} > U_{Nmotor}$$

$$I_{Nconv} > I_{Nmotor}$$

În plus, se vor avea în vedere condiții și informații privind:

- armonicile de tensiune;
- armonicile de curent;
- gradientul de tensiune dU/dt ;
- gradientul de curent dI/dt ;
- gradul normal de protecție;
- greutatea și dimensiunile de gabarit;

- distanța maximă dintre convertor și motor;
- vibrațiile suportate;
- temperatura mediului ambiant recomandată;
- factorul de putere;
- randamentul.

Etapa 10. Alegerea traductoarelor:

Traductoarele folosite frecvent în sistemele de acționare electromecanică servesc pentru controlul următorilor parametri:

- curent;
- tensiune;
- turație (viteză unghiulară);
- poziție;
- temperatură.

Alegerea acestora se face după regulile generale de alegere a elementelor dintr-un sistem, în plus se urmărește ca acestea să influențeze cât mai puțin procesul controlat.

Se menționează că, pentru sistemele de acționare, unii parametri (temperatură, turație, flux magnetic) pot fi estimați în timp real renunțându-se astfel la traductoarele clasice.

Etapa 11. Analiza economică a investiției și a economiilor realizate:

După cum este cunoscut, o soluție, un echipament, se alege după criterii tehnice (pentru sistemele de acționare electromecanică, cele enumerate mai sus) și după criterii economice. Fără a intra în detalii se menționează că trebuie avute în vedere:

- investiția inițială;
- costurile de întreținere și reparație;
- alte costuri (instalare, piese de schimb, filtre etc.).

3. SISTEME DE ACȚIONARE ELECTROMECHANICĂ CU MOTOARE DE CURENT CONTINUU ȘI VARIATOARE DE TENSIUNE CONTINUĂ

În cazul acționărilor alimentate de la surse de tensiune continuă autonome, reglarea vitezei se face prin modificarea în impulsuri a tensiunii aplicate motorului cu ajutorul variatoarelor de tensiune continuă (fig.3.1).

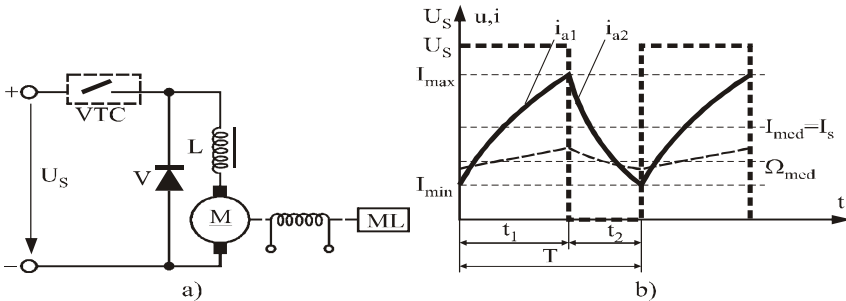


Fig. 3.1. Sistem de acționare cu variator de tensiune continuă:

a) schema de principiu; b) digrama variabilelor de intrare - stare - ieșire

Frecvența de comandă pentru instalațiile industriale este de 50-500 Hz, iar pentru cele cu inerție redusă până la 2000 Hz. Având în vedere valorile constantelor electromecanice comparativ cu perioada semnalului de comandă, rezultă că viteza sistemului poate fi considerată practic constantă. Notând cu t_1 intervalul de conducție, cu t_2 intervalul de pauză și cu T perioada semnalului de comandă, se poate defini factorul de semnal:

$$\alpha = \frac{t_1}{t_1 + t_2} = \frac{t_1}{T}, \quad (3.1)$$

și frecvența de comandă: $f = \frac{1}{T}$. (3.2)

Variatorul de tensiune continuă este un convertor care transformă tensiunea continuă constantă aplicată la intrare în impulsuri dreptunghiulare. Valoarea medie a tensiunii aplicate indusului:

$$U_{med} = \frac{1}{T} \int_0^{t_1} U_S dt = \alpha U_S. \quad (3.3)$$

Se observă că aceasta poate fi modificată fie prin reglarea factorului de semnal, frecvența rămânând constantă, fie prin reglarea frecvenței, factorul de semnal rămânând constant, sau prin reglarea simultană a frecvenței și a factorului de semnal.

În ipoteza că viteza sistemului este practic constantă, iar cuplul static este constant și suficient de mare, ecuația de echilibru a tensiunilor din circuitul indusului devine:

$$U_S = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + k\phi\Omega; 0 < t < \alpha T, \quad (3.4)$$

$$0 = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + k\phi\Omega; \alpha T < t < T, \quad (3.5)$$

unde L_a – inductivitatea totală din indus pentru m.c.c. cu excitație separată, sau inductivitatea totală din indus plus inductivitatea înfășurării de excitație pentru m.c.c. serie.

Valoarea medie a curentului din indus este egală cu curentul corespunzător cuplului static.

$$I_{med} = I_S = \frac{\alpha U_S - k\phi\Omega}{R_a}. \quad (3.6)$$

De aici:

$$k\phi\Omega = \alpha U_S - R_a I_S. \quad (3.7)$$

Înlocuind în ecuațiile (3.4), (3.5), rezultă:

$$U_S(1 - \alpha) = R_a (i_a - I_S) + L_a \frac{d(i_a - I_S)}{dt}; 0 < t < \alpha T \quad (3.8)$$

$$-\alpha U_S = R_a (i_a - I_S) + L_a \frac{d(i_a - I_S)}{dt}; \alpha T < t < T. \quad (3.9)$$

Punând aceste ecuații sub forma:

$$T_a \frac{d(i_a - I_S)}{dt} + (i_a - I_S) = (1 - \alpha) \frac{U_S}{R_a}; 0 < t < \alpha T \quad (3.10)$$

$$T_a \frac{d(i_a - I_S)}{dt} + (i_a - I_S) = -\alpha \frac{U_S}{R_a}; \alpha T < t < T \quad (3.11)$$

și integrând, se obține variația curentului în intervalul de conducție

$$i_{a1} - I_S = C_1 e^{-\frac{t}{T_a}} + \frac{U_S}{R_a} (1 - \alpha) \quad (3.12)$$

și în intervalul de pauză

$$i_{a2} - I_S = C_2 e^{-\frac{t}{T_a}} + \frac{U_S}{R_a} \alpha. \quad (3.13)$$

Constantele de integrare C_1 și C_2 se determină din condițiile inițiale și finale

$$i_{a1}(0) = I_{min}; i_{a2}(T) = I_{min}; i_{a1}(\alpha T) = i_{a2}(\alpha T). \quad (3.14)$$

$$\text{rezultă: } C_1 = I_{\min} - I_S - \frac{U_S}{R_a}(1 - \alpha); \quad (3.15)$$

$$C_2 = (I_{\min} - I_S + \frac{U_S}{R_a}\alpha)e^{\frac{t}{T_a}}, \quad (3.16)$$

respectiv:

$$i_{a1} = (I_{\min} - I_S + \frac{U_S}{R_a}(1 - \alpha))e^{-\frac{t}{T_a}} + I_S + \frac{U_S}{R_a}(1 - \alpha), \quad (3.17)$$

$$i_{a2} = (I_{\min} - I_S + \frac{U_S}{R_a}\alpha)e^{\frac{t}{T_a}}e^{-\frac{t}{T_a}} + I_S - \frac{U_S}{R_a}\alpha. \quad (3.18)$$

Din condiția $i_{a1}(\alpha T) = i_{a2}(\alpha T)$, rezultă:

$$I_{\min} = \frac{U_S}{R_a} \left(\frac{1 - e^{-\alpha \frac{T}{T_a}}}{1 - e^{-\frac{T}{T_a}}} - \alpha \right) + I_S. \quad (3.19)$$

Deci curentul prin indusul motorului pulsează în jurul valorii I_S care depinde de cuplul static M_S .

3.1. Ecuația caracteristicii mecanice

În regim de curent neîntrerupt, ecuația caracteristicii mecanice este de forma:

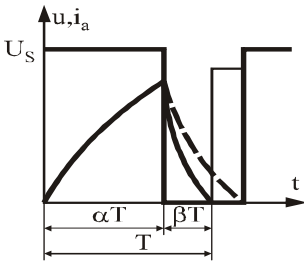


Fig. 3.2. Explicativă pentru regimul de curent întrerupt

$$\Omega = \frac{\alpha U_S}{k\phi} - \frac{R_a I_a}{k\phi}, \quad (3.20)$$

rezultând că acestea au forma tipică a caracteristicilor de tensiune.

Dacă cuplul rezistent are valori reduse, curentul prin indusul motorului se poate anula înainte de sfârșitul perioadei T (fig.3.2).

Notând cu βT intervalul în care curentul circulă prin dioda de nul, expresia tensiunii medii la bornele motorului devine:

$$U_{\text{med}} = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} U_S dt + \frac{1}{T} \int_{(\alpha+\beta)T}^T E dt = \alpha U_S + E(1 - \alpha - \beta). \quad (3.21)$$

În regim cvasistaționar:

$$U_{medî} = R_a I_{aî} + E, \quad (3.22)$$

Respectiv:

$$\alpha U_S + E(1 - \alpha - \beta) = R_a I_{aî} + E. \quad (3.23)$$

De aici ecuația caracteristicii mecanice în regim de curent întrerupt:

$$\Omega_i = \frac{\alpha U_S}{k\phi(\alpha + \beta)} - \frac{R_a I_{aî}}{k\phi(\alpha + \beta)}. \quad (3.24)$$

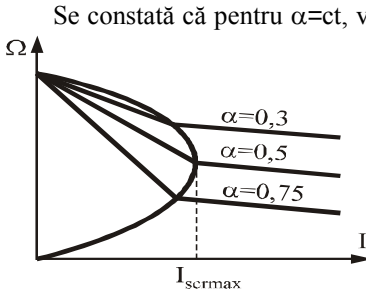


Fig. 3.3. Caracteristicile mecanice ale acțiunii cu m.c.c. și VTC

Se constată că pentru $\alpha = \text{ct}$, viteza de funcționare în gol ideal crește odată cu scăderea lui β , motorul având tendința de ambalare (fig.3.3).

Limita regimului de curent întrerupt se obține pentru $\beta = 1 - \alpha$.

Curentul de sarcină minim pentru existența regimului de curent neîntrerupt se obține din condiția $I_{\min} = 0$:

$$I_{scr} = \frac{U_S}{R_a} \left(\alpha - \frac{1 - e^{-\frac{\alpha T}{T_a}}}{1 - e^{-\frac{T}{T_a}}} \right) \quad (3.25)$$

Dezvoltând exponențiala în serie de puteri și reținând termenii până la puterea a doua, rezultă:

$$\begin{aligned} I_{scr} &= \frac{U_S}{R_a} \left(\alpha - \frac{1 - \left(1 - \frac{\alpha T}{T_a} - \frac{1}{2} \frac{\alpha^2 T^2}{T_a^2}\right)}{1 - \left(1 - \frac{T}{T_a} - \frac{1}{2} \frac{T^2}{T_a^2}\right)} \right) = \frac{U_S}{R_a} \left(\alpha - \frac{\frac{1}{2} \frac{T}{T_a} (2\alpha + \frac{1}{2} \frac{\alpha^2 T}{T_a})}{\frac{1}{2} \frac{T}{T_a} (2 + \frac{T}{T_a})} \right) = \\ &= \frac{U_S}{R_a} \left(\frac{2\alpha + \frac{\alpha T}{T_a} - 2\alpha - \alpha^2 \frac{T}{T_a}}{2 + \frac{T}{T_a}} \right) = \frac{U_S}{R_a} \frac{T}{T_a} \frac{\alpha - \alpha^2}{2 + \frac{T}{T_a}} \approx \frac{U_S}{R_a} \frac{T}{2T_a} (\alpha - \alpha^2) \end{aligned} \quad (3.26)$$

Valoarea maximă a acestui curent se obține din condiția:

$$\frac{dI_{scr}}{d\alpha} = 0; \quad 1 - 2\alpha = 0 \Rightarrow \alpha = \frac{1}{2} = 0,5 \quad (3.27)$$

La analiza caracteristicilor mecanice ale acționării cu m.c.c. serie trebuie să se țină seama că tensiunea electromotoare depinde atât de viteză cât și de curentul de sarcină $E=f(i_a, \Omega)$ aceasta putând fi liniarizată pe porțiuni.

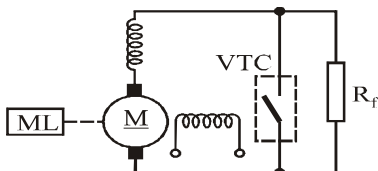


Fig.3.4. Schema de principiu pentru frânarea dinamică

Pentru analiza evoluției curentului și a caracteristicii statice se recomandă elaborarea unor modele numerice.

Pentru oprirea acționărilor cu m.c.c. și variatoare de tensiune continuă se poate aduce sistemul atât în regim de frânare recuperativă cât și în regim de frânare dinamică. Având în vedere principiul frânării recuperative și implicațiile funcționale determinate de puterea consumatorilor conectați la rețeaua de recuperare, se utilizează de obicei frânarea dinamică. Pornind de la schema indicată în fig.3.4 sunt utilizate practic și alte variante atât pentru m.c.c. cu excitație separată cât și pentru m.c.c. cu excitație serie.

3.2. Structura sistemelor de acționare cu m.c.c. și variatoare de tensiune continuă

Sistemul prezentat (fig.3.5) asigură comanda cu factor de semnal variabil și frecvența constantă determinată de frecvența generatorului de impulsuri GI.

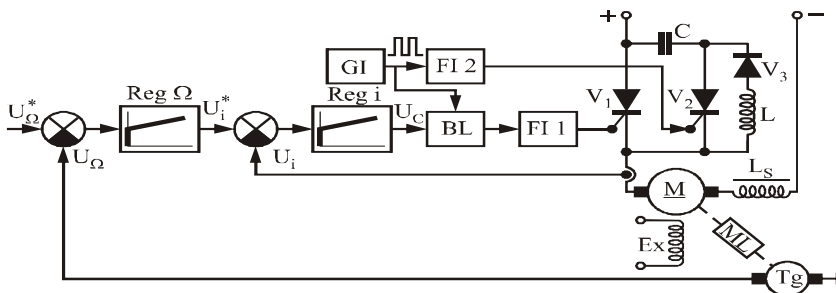


Fig.3.5. Structura sistemelor de acționare cu m.c.c. și variator de tensiune continuă.

Impulsurile de comandă sunt trimise spre tiristorul secundar V_2 prin intermediul formatorului de impulsuri FI_2 și spre blocul logic BL. Blocul logic transformă impulsurile dreptunghiulare în semnale linear variabile (fig.3.6) care sunt comparate cu mărimea de conducere U_c obținută de la regulatorul de curent.

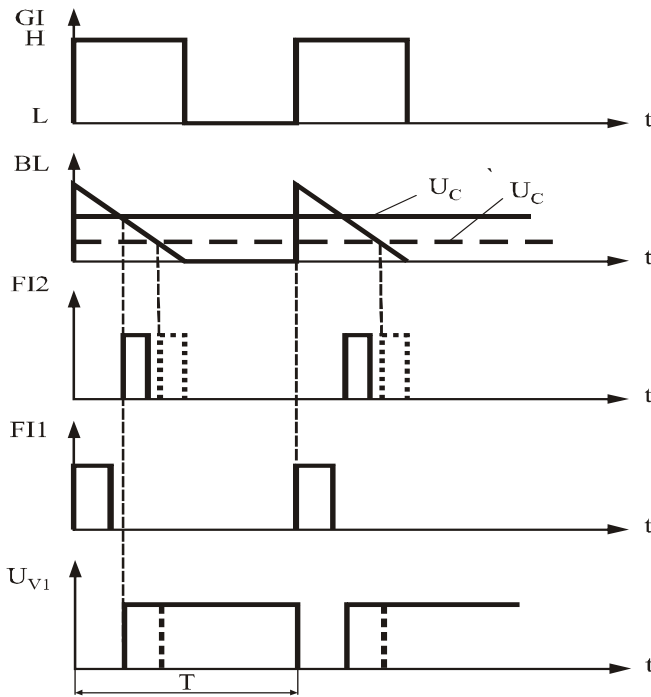


Fig.3.6. Formele de undă ale semnalelor de comandă.

La coincidența celor două semnale se trimite prin intermediul formatorului FI_1 un impuls de comandă pe poarta tiristorului principal. Funcționarea și rolul reguletoarelor de turație și curent este asemănătoare cu cea prezentată la sistemele cu redresoare comandate. Sistemele cu m.c.c. și variatoare de tensiune continuă se întâlnesc la acționarea tramvaielei, troleibuzelor, metrouilor etc.

3.3. Comanda adaptivă a sistemelor de acționare electromecanică cu m.c.c. și variatoare de tensiune continuă

Comanda adaptivă se impune în cazul sistemelor de acționare pentru care informația apriorică privind regimul de funcționare al mașinii de lucru este incompletă. În acest scop partea de comandă trebuie să asigure, pentru adaptare, două funcții:

- să măsoare variabilele din sistem;
- să modifice structura sistemului și să asigure comanda acestuia în concordanță cu evoluția variabilelor și cu scopul urmărit.

În cazul cuplurilor aleatoare (fig.3.7) (sarcină variabilă, urcarea unei rampe, coborârea unei pante) este necesară menținerea constantă a vitezei folosind succesiv două metode de reglare a vitezei: modificarea tensiunii de alimentare și diminuarea fluxului de excitație.

Pentru aceasta se consideră o structură variabilă (fig.3.8) formată din două contactoare statice: unul (VTC1) pentru modificarea tensiunii și al doilea (VTC2) pentru șuntarea înfășurării de excitație, respectiv reglarea fluxului de excitație.

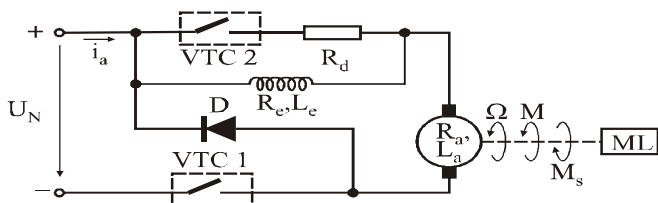


Fig.3.8. Structura sistemului de acțiune (partea de forță).

Se impune menținerea cvasiconstantă a vitezei în prezența cuplului static variabil între două limite $M_{\min}$ și $M_{\max}$ (fig.3.9) cu respectarea restricției $i_a < I_{\max \text{ ad.}}$

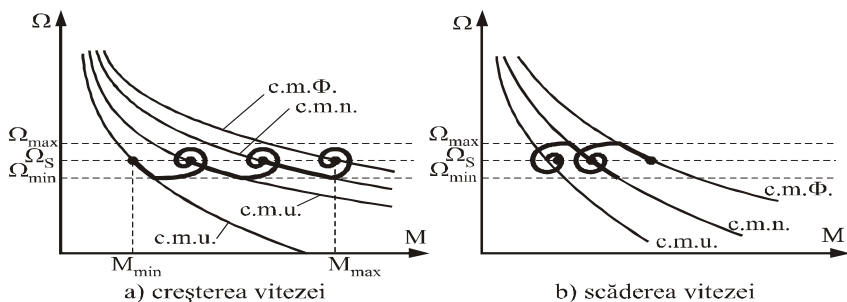


Fig.3.9. Deplasarea punctului de funcționare în planul stărilor.

Comanda sistemului se face pe baza algoritmului prezentat în fig.3.10 în care partea de sistem și de măsură au fost reprezentate ca obiecte orientate.

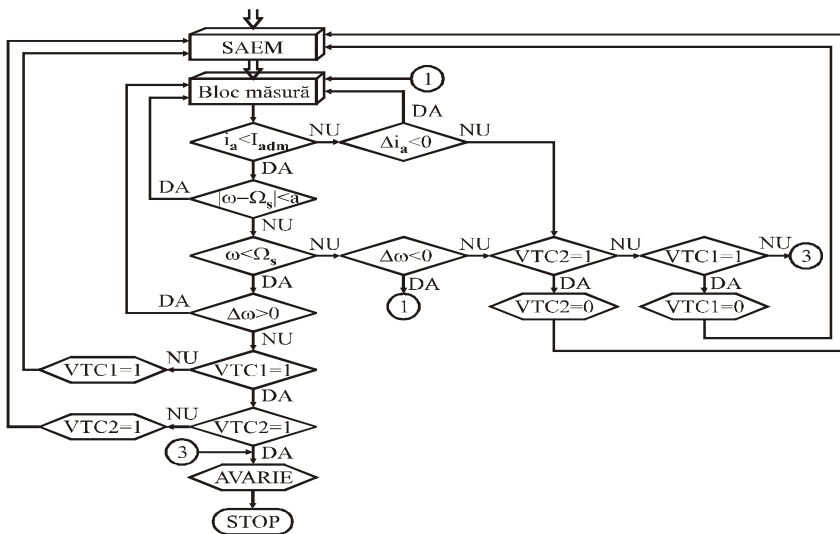


Fig.3.10. Algoritmul pentru comanda adaptivă.

În prima secvență se compară curentul real i_a cu valoarea maxim admisă $I_{\max ad}$, iar apoi viteza reală cu viteza prescrisă Ω_S .

Având în vedere viteza de răspuns a părții mecanice se admite că dacă:

$$(\omega - \Omega_S) < a$$

unde a este o eroare admisibilă, structura sistemului rămâne neschimbată.

Dacă această condiție nu este îndeplinită, sistemul de comandă poate lua următoarele decizii, în funcție de situația reală.

Astfel, dacă $\omega < \Omega_S$, atunci:

- se comandă creșterea tensiunii până se ajunge pe caracteristica mecanică naturală;
- se menține comanda de la momentul $t-\Delta t$, dacă viteza crește, adică

$$\Delta\omega=\omega(t)-\omega(t-\Delta t)>0;$$

- se comandă diminuarea fluxului prin șuntarea înfășurării de excitație.
- Dacă $\omega > \Omega_s$ atunci:
- se comandă scăderea vitezei prin creșterea fluxului de excitație;

- se menține comanda de la momentul $t-\Delta t$ dacă viteza scade, adică

$$\Delta\omega = \omega(t) - \omega(t-\Delta t) < 0;$$

- se comandă scăderea vitezei prin diminuarea tensiunii de alimentare.

Este prevăzută, de asemenea, posibilitatea semnalizării situațiilor limită: scăderea sau creșterea exagerată a vitezei la care sistemul nu poate face față.

Pentru realizarea comenzii adaptive, partea de comandă a fost prevăzută cu un microcontroler (fig.3.11) capabil să analizeze informațiile conform algoritmului de mai sus.

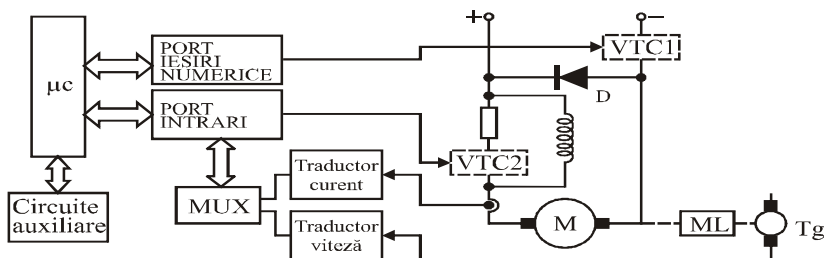


Fig.3.11. Structura sistemului de acționare pentru comanda adaptivă.

4. SISTEME DE ACȚIONARE ELECTROMECHANICĂ CU M.C.C. ȘI REDRESOARE COMANDATE

4.1. Introducere

Aceste sisteme se compun din acționarea clasică cu motoare de curent continuu și o sursă comandabilă de energie care, în acest caz este un redresor comandat trifazat sau monofazat (fig.4.1).

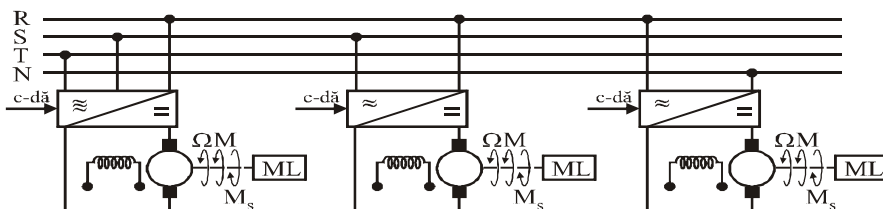


Fig.4.1. Principiul sistemelor de acționare cu m.c.c. și redresoare comandate.

La alegerea acestor sisteme trebuie să se țină seama și de dezavantajele lor:

- factorul de putere al întregului sistem mai scăzut;
- deoarece curentul furnizat de redresor este pulsatoriu, este necesară utilizarea unor bobine de filtrare sau utilizarea unor motoare special proiectate pentru aceste aplicații;
- deoarece tensiunea obținută de la redresor conține armonici, încălzirea motorului este mai mare decât la alimentarea cu tensiune netedă și sunt necesare măsuri suplimentare pentru evitarea transmiterii acestora în rețea.

Pentru aplicarea criteriilor de alegere a sistemelor de acționare electromecanică prezentate anterior este necesară analiza acestora din punct de vedere energetic, al cadranelor de funcționare și al puterii motorului electric.

4.2. Analiza sistemelor de acționare electromecanică cu m.c.c. și redresoare comandate în funcție de numărul de cadrane din planul $M0\Omega$

În funcție de destinația sistemului de acționare se pot configura structuri care să asigure funcționarea într-un singur cadran, în două cadrane adiacente sau complemetare respectiv în patru cadrane din planul $M0\Omega$.

4.2.1. Sisteme de acționare pentru funcționarea într-un singur cadran

Aceste sisteme se utilizează pentru acționarea mașinilor de lucru care nu impun reversarea sensului de rotație. Tipul redresorului depinde de puterea motorului electric de acționare. Astfel, pentru acționări cu $P_N < 0,5 \text{ kW}$ se utilizează redresoare monofazate monoalternanță (fig.4.2), pentru acționări cu $P_N < 2 \text{ kW}$ se utilizează redresoare monofazate dublă alternanță cu punct median (fig.4.3), iar pentru acționări cu $P_N < 5 \text{ kW}$ se utilizează redresoare în punte monofazată semicomandată sau complet comandată (fig.4.4).

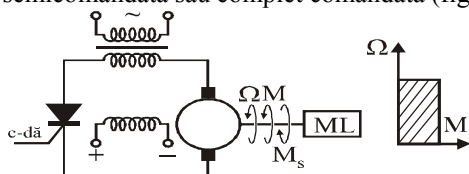


Fig.4.2. Sistem de acționare cu m.c.c. și redresor monofazat monoalternanță.

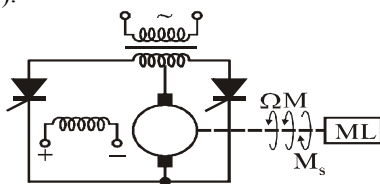


Fig.4.3. Sistem de acționare cu m.c.c. și redresor monofazat dublă alternanță cu punct median.

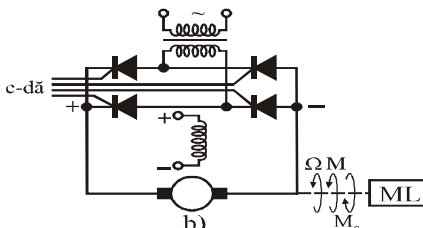
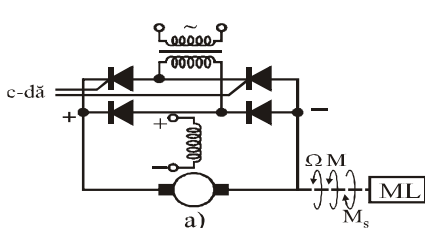


Fig.4.4. Sistem de acționare cu m.c.c. și redresoare monofazate în punte; a) semicomandată; b) complet comandată.

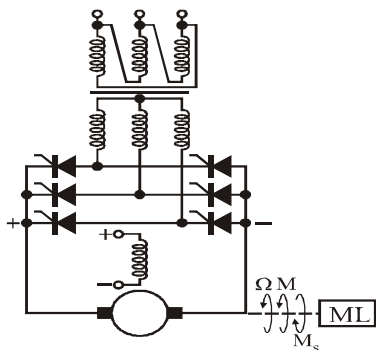


Fig.4.5. Sistem de acționare cu m.c.c. și redresor trifazat în punte.

Pentru puteri mai mari de 5 kW se utilizează redresoare trifazate în punte semicomandată sau complet comandată (fig.4.5).

4.2.2. Sisteme de acțiune pentru funcționarea în două cadrane

Cele două cadrane de funcțiune în planul $M\Omega$ pot fi:

- cadranele I și III (fig.4.6): acțiunea funcționează în regim de antrenare, sensul de rotație al motorului fiind diferit prin schimbarea sensului curentului din înfășurarea de excitație. În structura acestor sisteme se utilizează oricare dintre redresoarele prezentate mai sus, în funcție de puterea motorului;
- cadranele I și IV (fig.4.6): acțiunea funcționează în regim de antrenare (cadrantul I) și în regim de frână (cadrantul IV). În structura acestor sisteme se utilizează redresoare în punte complet comandată pentru a putea comanda convertorul în regim de redresor și respectiv, în regim de inverter;
- cadranele I și II (fig.4.6). În cadrantul II acțiunea funcționează în regim de frână recuperativă sau dinamică. Aceste sisteme au în structura lor două redresoare montate în opoziție (fig.4.7) respectiv unul pentru regimul de antrenare și al doilea pentru regimul de frână (fig.4.8).

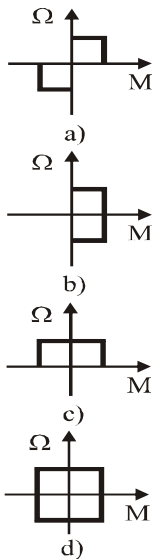


Fig.4.6. Explicativă privind numărul de cadrane

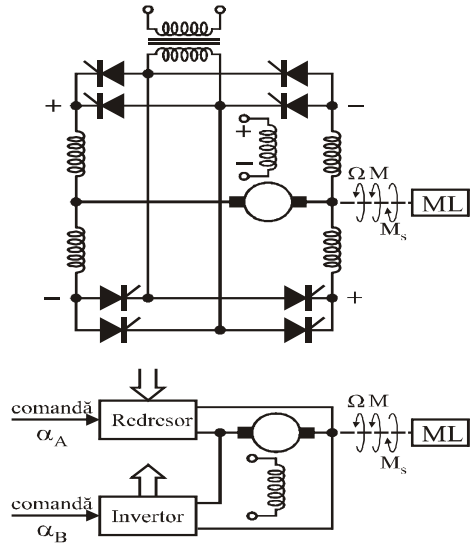


Fig.4.7. Structura unui sistem de acțiune pentru funcționarea în două sau patru cadrane.

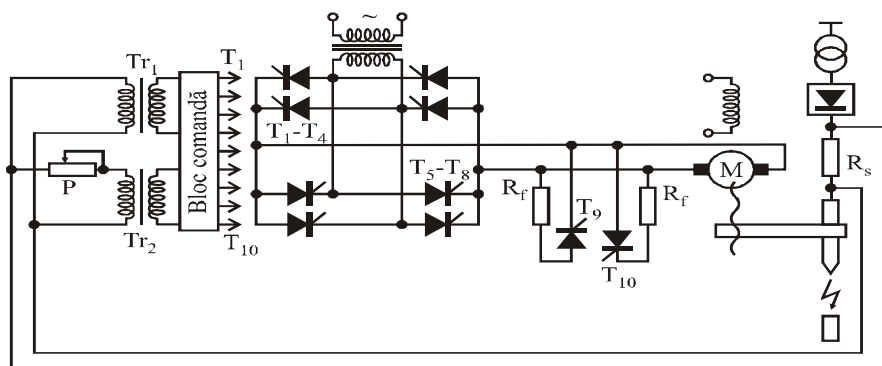


Fig.4.8. Structura sistemelor de urmărire rapide.

4.2.3. Sisteme de acționare pentru funcționarea în toate cele patru cadrane

Structura acestora este identică cu cea a celor pentru funcționarea în două cadrane, adaptându-se corespunzător comanda celor două convertoare.

$$\alpha_A + \alpha_B > 180^\circ \quad (4.1)$$

sau

$$\alpha_A + \alpha_B = 180^\circ \quad (4.2)$$

Pentru comanda indicată prin relația (4.1) cele două punți sunt comandate simultan, iar prin condiția impusă se anulează curenții de circulație între cele două redresoare. Schimbarea sensului de rotație presupune o logică de trecere particulară în care intervine un timp mort de câteva milisecunde. Această structură se recomandă pentru acționările la care reversarea de sens se face rar sau în repaos, iar funcționarea la sarcină redusă este puțin probabilă.

Pentru comanda indicată prin relația (4.2) între cele două punți există permanent curenți de circulație sau în anumite intervale. Pentru limitarea lor se utilizează inductivități suplimentare. Se recomandă pentru acționările care funcționează frecvent în gol sau la sarcină redusă pentru evitarea regimului de curent întrerupt.

Un caz particular îl constituie sistemele de urmărire rapide, fig.4.8, (ex. sistemele de acționare a portelectrodului sau de prelucrare prin electroeroziune) la care acționarea funcționează în regim de antrenare (cadranele I și III) în regim de frână recuperativă (cadranele II și IV) sau în regim de frână dinamică (cadranele II și IV), dacă se comandă corespunzător tiristoarele T_9 și T_{10} .

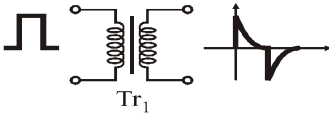


Fig.4.9. Răspunsul transformatorului de separare.

Cele două transformatoare Tr_1 și Tr_2 au rol de separare galvanică între partea de forță și partea de comandă, dar și funcția de element predictiv prin răspunsul derivativ la semnalul treaptă provenit din proces (fig.4.9).

4.3. Structura și funcționarea sistemelor de acțiune electromecanică nereversibile cu motoare de curent continuu și redresoare comandate

4.3.1. Structura

Sistemele de acțiune cu motoare de curent continuu și redresoare comandate se compun din (fig.4.10) mașina de lucru, motorul electric, redresorul comandat, dispozitivul de comandă pe grilă, transformatorul de sincronizare, reguloare, elementul de prescriere a turației, traductoare de turație și curent, alte elemente auxiliare.

În această structură motorul electric funcționează pe caracteristici artificiale de tensiune (fig.4.11):

$$\Omega = \frac{U_a}{k\Phi_N} - \frac{R_a}{(k\Phi_N)^2} M, \quad (4.3)$$

unde U_a este tensiunea variabilă obținută la ieșirea redresorului comandat.

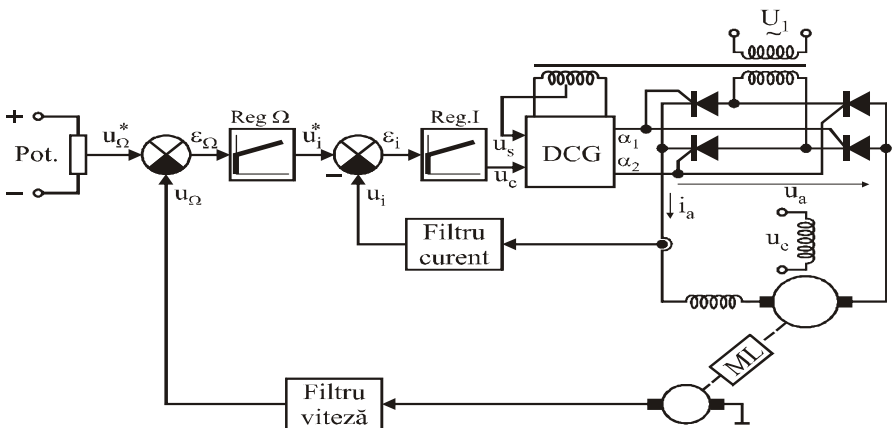


Fig.4.10. Structura sistemului automat de acțiune electromecanică cu motor de curent continuu și redresor monofazat în punte complet comandată.

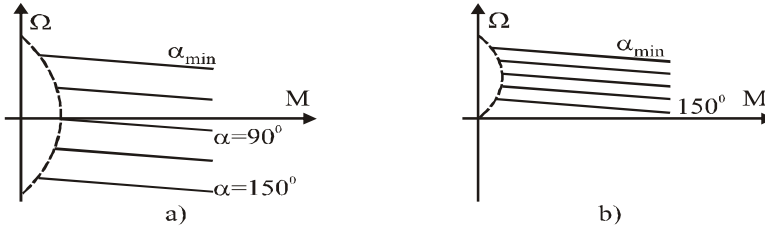


Fig.4.11. Caracteristicile mecanice ale motorului de curent continuu cu excitație separată: a) punte complet comandată; b) punte semicomandată.

Particularitatea specifică acestor caracteristici este că la sarcini reduse și pentru inductivități mici din circuitul indusului, acționarea poate ajunge la regimul de curent întrerupt, regim nedorit și evitat prin diferite soluții tehnice.

Unghiul $\alpha_{\min}$ este cea mai mică valoare a unghiului de comandă pentru care este garantată intrarea în conducție a tiristorului.



Fig.4.12. Redresorul comandat ca obiect orientat

Redresorul comandat, considerat ca obiect orientat (fig.4.12) primește la intrare mărimea de comandă α și furnizează la ieșire o tensiune continuă reglabilă.

Ecuția caracteristicii statice (fig.4.13) este de forma:

$$U_d = U_{d0} \cos \alpha \quad (4.4)$$

pentru redresoare complet comandate și de forma:

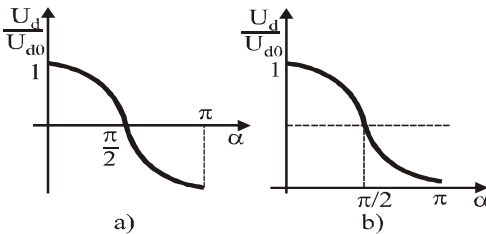


Fig.4.13. Caracteristica statică a unui redresor complet comandat (a) și a unui redresor semicomandat (b).

$$U_d = U_{d0} \frac{1 + \cos \alpha}{2} \quad (4.5)$$

pentru redresoare semicomandate, unde

$$U_{d0} = \sqrt{2} U_f \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} \quad (4.6)$$

U_{d0} - tensiunea obținută de la un redresor necomandat
 m - numărul de pulsuri redresate
 U_f - tensiunea de fază la intrarea în redresor.

Analiza diagramelor din fig.4.14 arată că, în anumite condiții redresorul răspunde la comanda dată u_c , cu un timp mort maxim (fig.4.15).

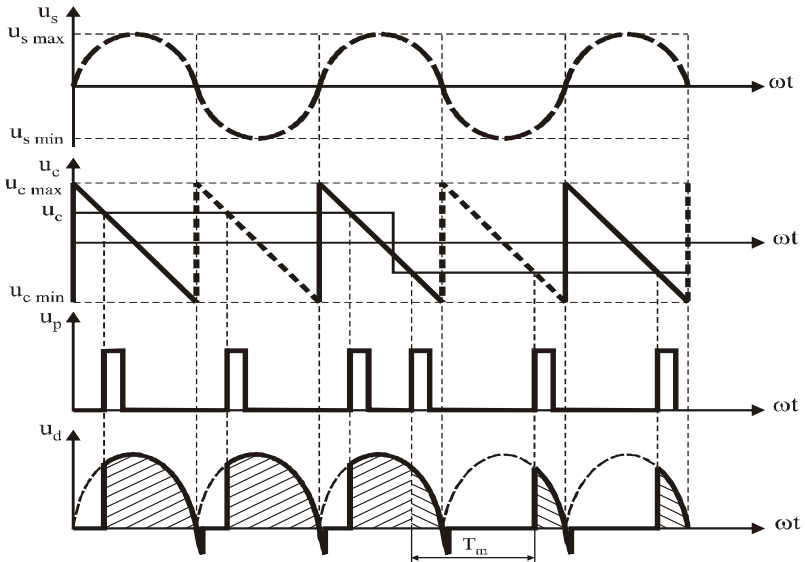


Fig.4.14. Explicativă privind funcționarea DCG și a redresorului ca element cu timp mort.

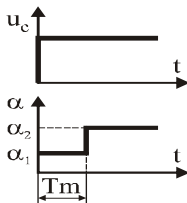


Fig.4.15. Răspunsul redresorului ca element cu timp mort.



Fig.4.16. Dispozitivul de comandă pe grilă - obiect orientat.

$$T_m = \frac{T}{m} \quad (4.7)$$

unde: T – perioada tensiunii alternative
 m – numărul de pulsuri redresate
 În analiza sistemelor automate de acțiune electromecanică se consideră:

$$T_m = \frac{1}{2} \frac{T}{m} = \frac{1}{2} \frac{1}{f} \frac{1}{m} \quad (4.8)$$

iar funcția de transfer a redresorului ca element cu timp mort este de forma:

$$G_{Rd}(s) = k_R e^{-sT_m} \quad (4.9)$$

Dezvoltând în serie exponențială și reținând termenii de ordinul I se obține forma:

$$G_{Rd}(s) = \frac{k_R}{1 + sT_m} \quad (4.10)$$

unde k_R este factorul de amplificarea al redresorului: $k_R = U_{d0} \cos \alpha$

Dispozitivul de comandă pe grilă - DCG are rolul de a furniza semnale α , pentru comanda tiristorului, sincron cu semialternanța aplicată acestuia și în funcție de mărimea de comandă u_c . În acest scop, conține două generatoare de tensiune

liniar variabilă care transformă tensiunea alternativă primită de la transformatorul de sincronizare într-o tensiune liniar variabilă pe durata unei semialternanțe și constantă pe durata celeilalte semialternanțe (fig.4.14).

La coincidența mărimii de comandă u_c , obținută de la regulatorul de curent, cu tensiunea liniar variabilă, DCG furnizează un impuls de comandă u_p aplicat pe poartă tiristorului.

Ținând seama de principiul de funcționare de mai sus, rezultă că DCG, ca element de automatizare are ca mărime de intrare (fig.4.16) tensiunea u_c , ca mărime de ieșire unghiul de comandă α , iar caracteristica statică este liniară. Printr-o polarizare adecvată, caracteristica statică poate fi translatată în planul intrare u_c – ieșire α (fig.4.17).

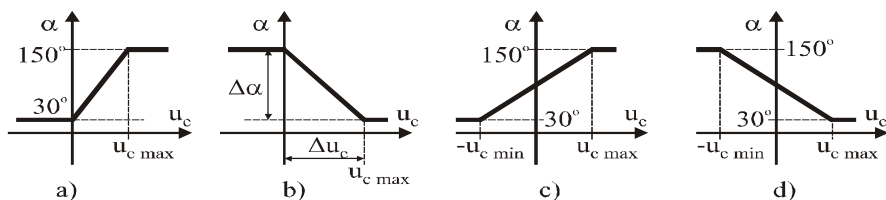


Fig.4.17. Caracteristica statică a DCG și poziționarea ei în planul intrare - ieșire.

Funcția de transfer este specifică elementelor proporționale:

$$G_{DCG}(s) = \frac{\Delta\alpha}{\Delta u_c} \quad (4.11)$$

Regulatorul de curent – are rolul de a îmbunătăți comportarea dinamică a sistemului și de a limita curentul furnizat motorului, pentru aceeași mărime prescrisă la intrarea sistemului u_Ω^* .

Un regulator, în particular regulatorul de curent, este format dintr-un amplificator, cu factor de amplificare reglabil, o rețea de corecție pe circuitul de reacție și un element de însumare algebrică între mărimea prescrisă u_i^* și mărimea de reacție u_i proporțională cu curentul din indusul motorului (fig.4.18). Tipul rețelei de corecție este inversul tipului regulatorului. Pentru sistemele de acționare se utilizează regulatoare proporțional - integratoare la care rețeaua de corecție este de tip derivativ.

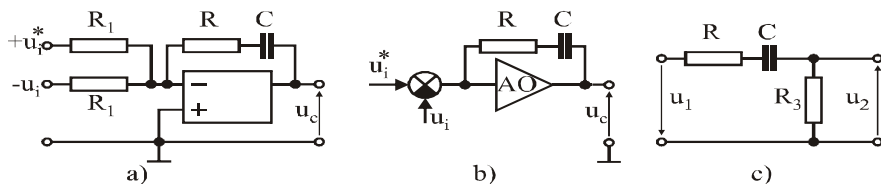


Fig.4.18. Regulatorul de curent proporțional integrator; a) schema electrică de principiu; b) schema structurală; c) rețeaua de corecție.

Mărimea de reacție:

$$u_i = k_i i_a \quad (4.12)$$

este obținută de la traductorul de curent și filtrată pentru eliminarea undulațiilor curentului real, iar mărimea prescrisă este obținută de la elementul din amonte.

Eroarea de curent:

$$\varepsilon_i = u_i^* - u_i \quad (4.13)$$

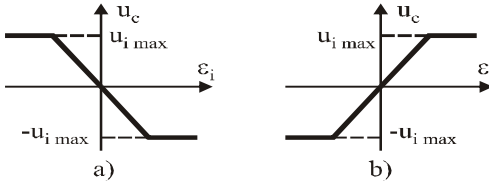


Fig.4.19. Caracteristica statică a regulatorului de curent.

a) cu intrare inversoare;

b) cu intrare neinversoare.

reprezintă mărimea de intrare în regulator.

Caracteristica statică a regulatorului (fig.4.19) este liniară până la atingerea valorii de saturație:

$$u_c = k_i \varepsilon_i \quad (4.14)$$

unde $k_i = \frac{R}{R_l}$ - factorul de

proporționalitate al regulatorului de curent.

Comportarea regulatorului în regim dinamic este descrisă de ecuația diferențială intrare - ieșire în care se identifică componenta P - proporțională cu eroarea și componenta I - proporțională cu integrala erorii

$$u_c = k_i \varepsilon_i + \frac{k_i}{T_{ii}} \int \varepsilon_i dt \quad (4.15)$$

unde T_{ii} - timpul de integrare al regulatorului de curent.

În răspunsul regulatorului la semnalul treaptă (fig.4.20) se identifică cele două componente: proporțională cu eroarea și proporțională cu integrala erorii.

Aplicând transformata Laplace ecuației diferențiale intrare - ieșire (4.15) pentru condiții inițiale nule se obține ecuația operațională intrare - ieșire:

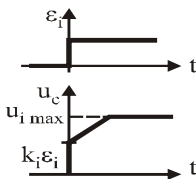
$$U_c(s) = k_i E_i(s) + \frac{k_i}{sT_{ii}} E_i(s) \quad (4.16)$$

Funcția de transfer:

$$G_{RI}(s) = \frac{U_c(s)}{E_i(s)} \quad (4.17)$$

$$G_{RI}(s) = k_i + \frac{k_i}{sT_{ii}} \quad (4.18)$$

Fig.4.20. Răspunsul ideal al regulatorului PI la semnal treaptă.



Rolul buclei de curent este de a permite curentului i_a să urmărească foarte rapid variația mărimii prescrise u_i^* , pentru a asigura pentru cuplul de antrenare o valoare suficientă pentru ca regimul tranzitoriu să fie cât mai scurt, iar suprareglajul (fig.4.21) să nu depășească 5% din valoarea staționară.

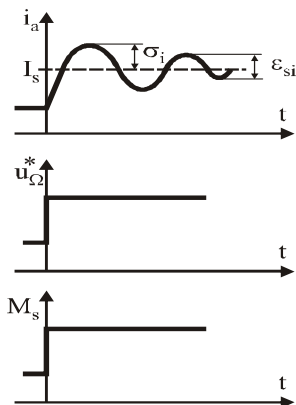


Fig.4.21. Regimul tranzitoriu al curentului din indus la variația treaptă a mărimii prescise u_{Ω}^* sau M_s .

De asemenea, regulatorul de curent asigură reducerea erorii staționare ε_{si} , prin componenta de integrare și limitarea gradientului curentului di/dt prin saturarea amplificatorului.

Structura sistemului poate să conțină numai bucla de curent dacă automatizarea urmărește numai reglarea acestuia.

Este cazul instalațiilor de înfășurat (fig.4.22) care dezvoltă cuplu static invers proporțional cu viteza, iar tensiunea T în materialul bobinat este menținută constantă prin controlul curentului cerut de motor.

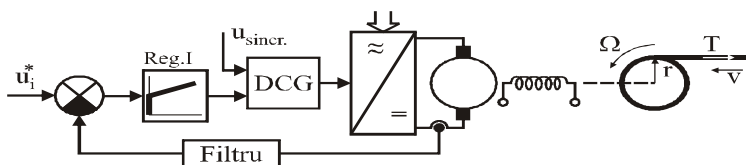


Fig.4.22. Aplicație pentru sistemele de acționare a instalațiilor de înfășurat.

Regulatorul de viteză

Dacă se dorește menținerea constantă a vitezei impuse, în prezența variației cuplului static (perturbația sistemului) este necesară adăugarea, în cascadă, a unui regulator de viteză.

Structura acestuia și caracteristica statică este asemănătoare cu a regulatorului de curent.

Eroarea de viteză:

$$\varepsilon_{\Omega} = u_{\Omega}^* - u_{\Omega}$$

se obține prin însumarea algebrică a vitezei reale și a mărimii impuse pentru viteză u_{Ω}^* , obținută de la potențiometru P sau de la un bloc specializat

Viteza reală:

$$u_{\Omega} = k_{T\Omega} \omega$$

este măsurată cu ajutorul unui traductor de viteză și filtrat pentru eliminarea undulațiilor.

Mărima de ieșire din regulator este mărime prescrisă pentru curent iar ecuația diferențială intrare – ieșire este de forma:

$$u_i^* = k_\Omega \varepsilon_\Omega + \frac{k_\Omega}{T_{i\Omega}} \int \varepsilon_\Omega dt, \quad (4.19)$$

unde: $T_{i\Omega}$ - timpul de integrare al regulatorului,
 k_Ω - factorul de proporționalitate al regulatorului de viteză.
 Funcția de transfer:

$$G_{R\Omega}(s) = \frac{U_i^*(s)}{E_\Omega(s)},$$

$$G_{R\Omega}(s) = k_\Omega + \frac{k_\Omega}{sT_{i\Omega}} \quad (4.20)$$

Bucula de viteză are rolul de a menține constantă viteza acționării și de a asigura stabilitatea sistemului.

Potențiometrul P_{OT} este un element liniar cu caracteristică statică (fig.4.23) descrisă de ecuația:

$$u_\Omega^* = k_p x \quad (4.21)$$

În unele aplicații (comandă optimală) mărimea prescrisă pentru viteză este obținută de la un bloc specializat.

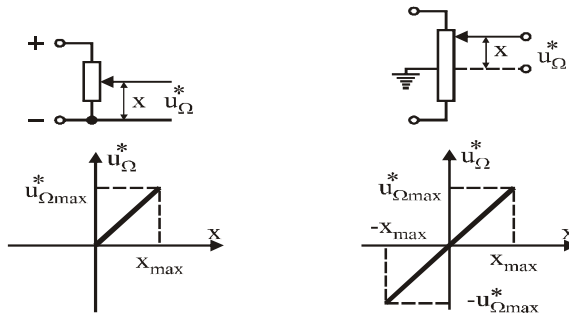


Fig.4.23. Schema și caracteristica statică a potențiometrului.

Ținând seama de funcțiile de transfer ale elementelor componente, se obține schema structurală bloc (fig.4.24) a sistemului de acționare cu m.c.c. și redresor comandat.

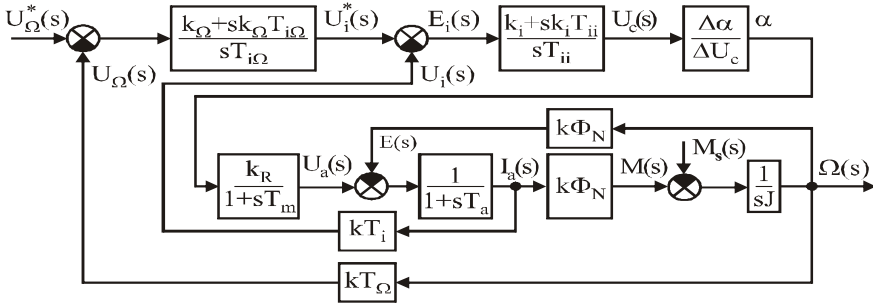


Fig.4.24. Schema structurală bloc a sistemului de acționare cu m.c.c. și redresor comandat.

4.3.2. Funcționarea

Se consideră regimul staționar corespunzător vitezei Ω_{s1} și cuplului static M_s (fig.4.25).

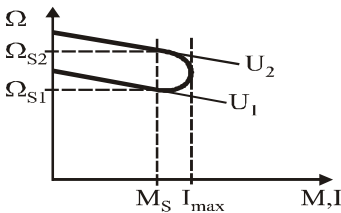


Fig.4.25. Explicativă pentru funcționarea la modificarea mărimii prescrise.

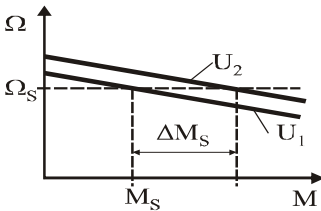


Fig.4.26. Explicativă pentru funcționarea la modificarea perturbației.

Curentul din indus:

$$I_a = \frac{M_s}{k\Phi_N} \quad (4.22)$$

iar tensiunea de alimentare:

$$U_a = R_a I_a + k\Phi_N \Omega_s \quad (4.23)$$

Se consideră o creștere treaptă a mărimii prescrise.

Eroarea de viteză:

$$\varepsilon_\Omega = u_\Omega^* - u_\Omega > 0 \quad (4.24)$$

Considerând că regulatorul de viteză are caracteristică statică neinversoare, rezultă că $u_i^* > 0$ crește eroarea de curent

$$\varepsilon_i = u_i^* - u_i > 0 \quad (4.25)$$

iar mărimea de conducere $u_c > 0$ crește. Rezultă (fig.4.14) că tiristorul este comandat la un unghi de apindere mai mic, tensiunea

medie redresată este mai mare iar curentul din indus crește

$$U_a \uparrow = R_a I_a \uparrow + k\Phi_N \Omega \quad (4.26)$$

ca urmare, cuplul electromagnetic $M = k\Phi_N I_a > M_s$ și sistemul accelerează.

Bucula de curent începe să lucreze și limitează curentul la valoarea I_{max} . Pe măsură ce viteza crește, curentul din indus scade:

$$U_a = R_a I_a \downarrow + k\Phi_N \Omega \uparrow \quad (4.27)$$

ajungându-se la un nou regim staționar pentru punctul (M_s, Ω_{s2}) .

Funcționarea este asemănătoare și la diminuarea mărimii prescrise u_{Ω}^* .

Pornind tot din regim staționar și considerând o creștere treaptă ΔM_s a cuplului static (fig.4.26), viteza sistemului scade, eroarea de viteză crește, mărimea prescrisă pentru curent crește, eroarea de curent crește, mărimea de comandă u_c crește, iar unghiul de comandă scade (fig.4.14, fig.4.17.b) rezultând creșterea tensiunii medii redresate. Motorul va fi alimentat cu tensiunea $U_2 > U_1$ și va funcționa la aceeași viteză impusă Ω_s . Funcționarea este asemănătoare și la scăderea cuplului static.

4.4. Structura și funcționarea sistemelor de acțiune electromecanică reversibile

4.4.1. Sisteme de poziționare

Se consideră acțiunea de mică putere a unui robinet din instalațiile termice. Motorul de acțiune este cu rotor disc, cu puterea de 180W și se utilizează un redresor monofazat monoalternanță (fig.4.27).

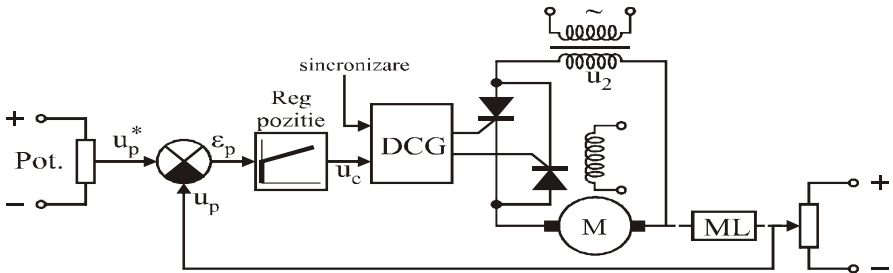


Fig.4.27. Structura sistemului reversibil.

Pentru a ilustra funcționarea sistemului se consideră trei cazuri:

- a) cursorul potențiometrului este deplasat din poziția $u_p^* = 0$, într-o poziție oarecare $u_p^* > 0$.

Tensiunea de comandă aplicată la intrarea DCG va avea valoarea $u_{c1} > 0$, iar tensiunea medie redresată $u_a > 0$. Rezultă (fig.4.28) că motorul se va roti, spre exemplu, în sensul deschiderii robinetului.

- b) robinetul a ajuns în poziția prescrisă iar eroarea de poziție

$$\varepsilon_p = u_p^* - u_p = 0$$

Tensiunea de comandă aplicată la intrarea DCG va avea valoarea $u_{c2}=0$, iar tensiunea medie redresată $u_a=0$ deoarece este redresată jumătate din semialternanța pozitivă și jumătate din semialternanța negativă.

c) cursorul potențiometrului este deplasat spre poziția $u_p^*=0$.

Tensiunea de comandă aplicată la intrarea DCG va avea valoarea $u_{c3}<0$, iar tensiunea medie redresată $u_a<0$. Rezultă (fig.4.28) că motorul se va roti în sens invers pentru închiderea robinetului.

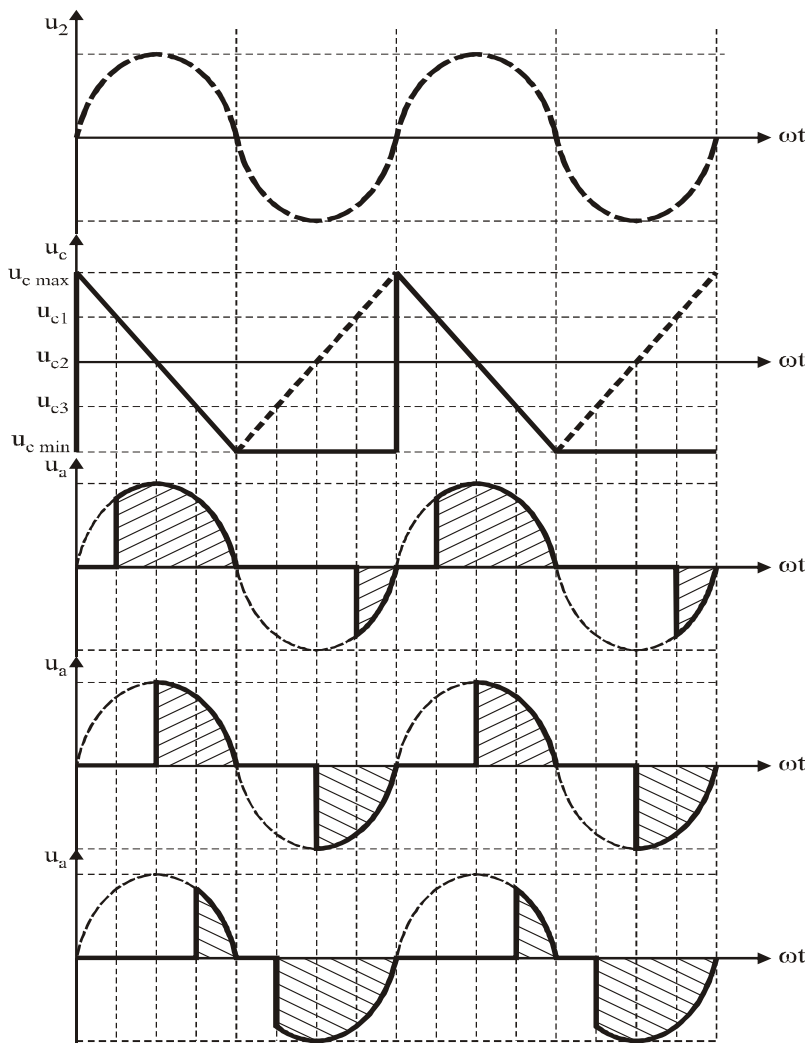


Fig.4.28. Explicativă privind funcționarea sistemului reversibil.

5. SISTEME DE ACȚIONARE ELECTROMECHANICĂ CU MOTOARE ASINCRONE ȘI VARIATOARE DE TENSIUNE ALTERNATIVĂ

5.1. Principiul sistemului de acțiune

În practica industrială sunt multe acțiuni echipate cu motoare asincrone cu rotor în scurtcircuit care au frecvență ridicată a pornirilor și nu necesită reglarea vitezei într-o gamă mai mare de $(1,2 \dots 1,3)/1$. Este cazul acțiunii pompelor din punctele termice, a brațelor mecanice pentru înfășurarea cu polietilenă a paletelor cu materiale de construcții (BCA, cărămidă, țiglă etc.) sau dispozitivele de susținere a laminatelor din aluminiu în procesul de extrudare. La acestea se adaugă o multitudine de acțiuni cu motoare monofazate.

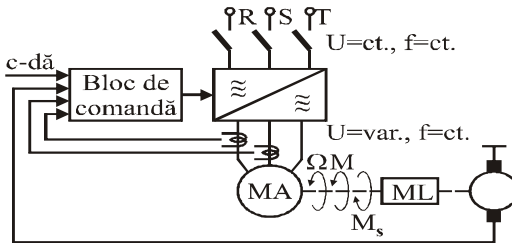


Fig.5.1. Principiul sistemului de acțiune cu m.a. și variatoare de tensiune alternativă.

Pentru aceste aplicații se justifică din punct de vedere economic utilizarea variatoarelor de tensiune alternativă (fig.5.1) având în vedere construcția lor mai simplă dar și asocierea cu microcontrolere care, pe lângă comanda propriu-zisă a VTA, la pornire și

frânare, preiau și funcțiile de protecție la suprasarcină, nesimetria tensiunilor, dezechilibrul curenților etc.

Pentru a modifica valoarea efectivă a tensiunii aplicată motorului, pe fazele motorului se montează două tiristoare antiparalele (fig.5.2) sau pentru motoare de putere mică se utilizează dispozitive semiconductoare bidirecționale (triac).

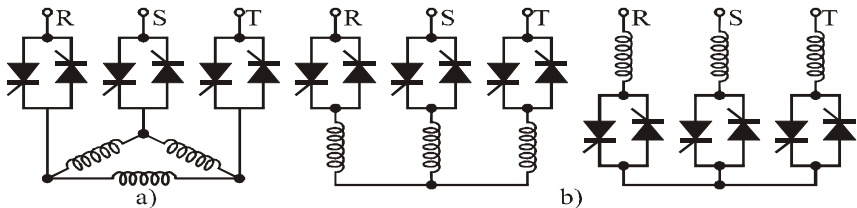


Fig.5.2. Variante de conectare a VTA în raport cu fazele motorului.

Deși soluția prezentată în fig.5.2.b este avantajoasă pentru partea de comandă, deoarece toate tiristoarele au un punct comun, în practică se utilizează varianta din fig.5.2.a, deoarece poate fi utilizată și pentru motoarele care au scoase în cutia de borne numai trei capete ale înfășurărilor.

În plus, prin adăugarea a încă două module (fig.5.3) este posibilă inversarea sensului de rotație, iar printr-o comandă adecvată (fig.5.3.b) motorul este adus în regim de frână dinamică.

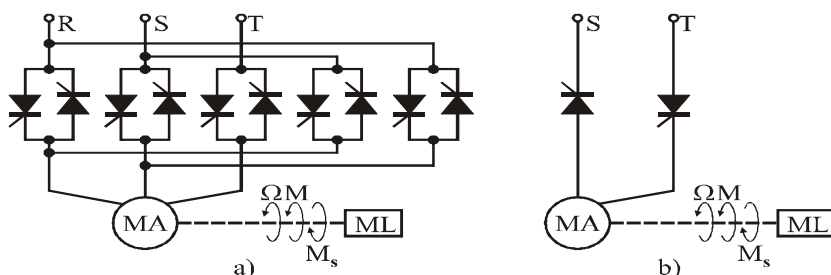


Fig.5.3. Structura părții de forță pentru inversarea sensului de rotație (a) și pentru frânarea dinamică (b).

Principalele dezavantaje ale acestor sisteme sunt legate de:

- înrăutățirea factorului de putere deoarece, în timpul pornirii, unghiul de întârziere la aprindere determină un defazaj suplimentar al curentului din motor;
- conținutul de armonici este foarte mare, ceea ce determină creșterea pierderilor în motor și oscilații ale cuplului la viteze joase, precum și poluarea rețelei.

Ele sunt diminuate prin faptul că se manifestă numai pe intervalul de pornire. Așadar, motorul pornește pe caracteristici artificiale de tensiune (fig.5.4) descrise de expresia:

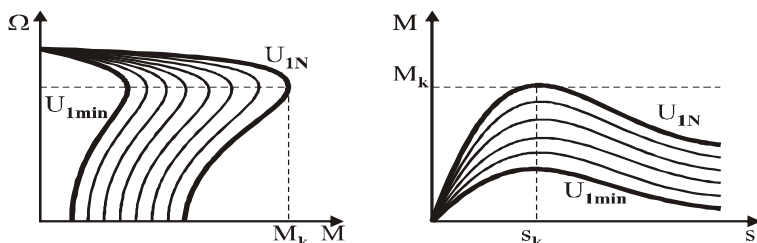


Fig.5.4. Caracteristicile mecanice la pornirea acționării.

$$M = \frac{U_{lx}^2}{\Omega_0} \frac{\frac{R'_{20}}{s}}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2})^2} \quad (5.1)$$

sau de formula lui Kloss:

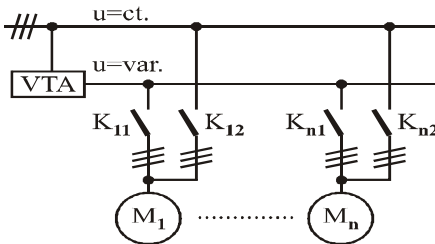


Fig.5.5. Soluție de pornire a n motoare cu un singur VTA.

$$M = \frac{2M_{kU}}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} \quad (5.2)$$

Se subliniază că în cazul unor aplicații la care se utilizează mai multe motoare de aceeași putere sau cu puteri apropiate și care pot fi pornite succesiv, se folosește un singur variator de tensiune alternativă utilizat pentru pornirea fiecărui motor (fig.5.5).

5.2. Structura sistemului de acționare

Având în vedere structura părții de forță, rezultă că partea de comandă, inclusiv funcționarea acesteia (fig.5.6), este asemănătoare cu cea a sistemelor cu redresoare comandate.

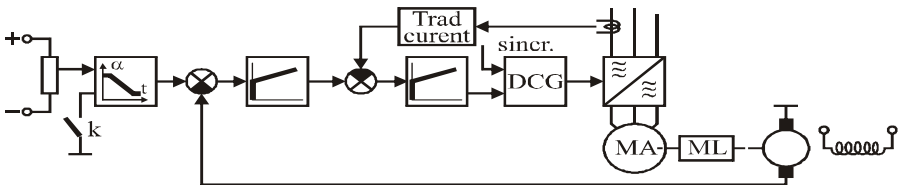


Fig.5.6. Structura sistemului automat de acționare cu motor asincron și VTA.

Particularitățile sunt determinate de modul în care are loc pornirea acționării; din acest punct de vedere, se întâlnesc trei metode:

- a) pornirea cu rampă de tensiune

Tensiunea la bornele motorului crește progresiv de la cca 85V la cca 320V după care VTA este șuntat iar motorul este alimentat direct de la rețea. Unghiul de comandă α scade de la 50° la 12° într-un interval de timp reglabil între 1 și 30 secunde (fig.5.7).

Dezavantajul acestei metode este determinat de timpul mare de pornire și cuplul redus dezvoltat de motor, care trebuie să fie mereu mai mare decât cuplul static. În plus, soluția nu ține seama de condițiile reale de pornire (aparitia cuplului de înțepenire, cuplu static mai mare decât cel normal etc.).

b) pornirea prin limitarea curentului (fig.5.8)

Această metodă este posibilă numai pentru sistemele în circuit închis cu reacție după curent, iar curentul este limitat între 2 și $5I_N$, în funcție de numărul de porniri pe unitatea de timp. Se pornește cu unghiul de comandă de cca 50° , adică cu cca 85V, rampa de tensiune crește rapid timp de cca 1 sec, până când curentul ajunge la $(4 \dots 4,5)I_N$, după care tensiunea crește lent astfel încât curentul să se mențină sub $4,5I_N$.

Prin această metodă se reduce timpul de pornire dar solicitările mecanice și termice sunt mai mari decât în cazul precedent.

c) pornirea cu rampă de tensiune și limitarea curentului

Se combină cele două metode anterioare, obținându-se o reducere a curentului în timpul pornirii, dar și o creștere a timpului de pornire (fig.5.9).

Unele VTA au posibilitatea de a aplica motorului întreaga tensiune (cca 320 V) în primele 100 ms (cca 5 semialternanțe) pentru învingerea cuplului de înțepenire, după care se trece la una din metodele de pornire prezentate mai sus.

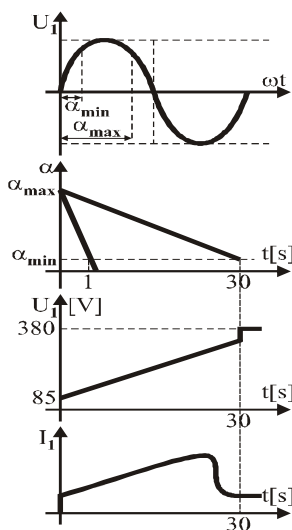


Fig.5.7. Explicativă privind pornirea cu rampă de tensiune.

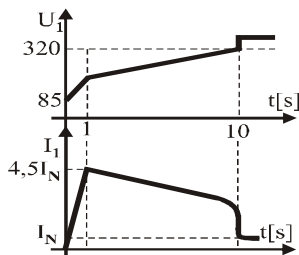


Fig.5.8. Explicativă privind pornirea prin limitarea curentului.

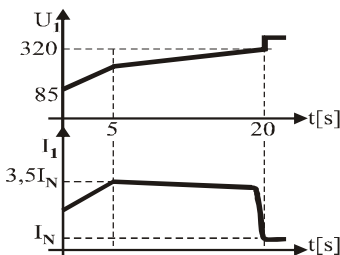


Fig.5.9. Explicativă privind pornirea combinată.

5.3. Comanda numerică a sistemelor de acționare cu motoare asincrone și variatoare de tensiune alternativă

Studiu de caz

Partea de comandă se simplifică mult, iar funcțiile realizate de aceasta pot fi evolute dacă se utilizează pentru comandă un microcontroler, spre exemplu 80C552 (fig.5.10). Blocul de sincronizare asigură un impuls la fiecare trecere prin zero a tensiunii fazei respective (fig.5.11).

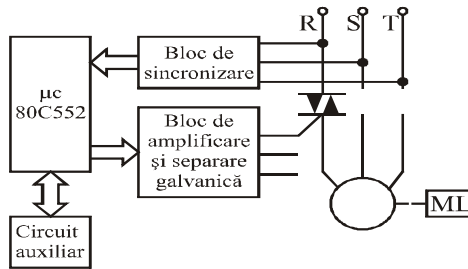
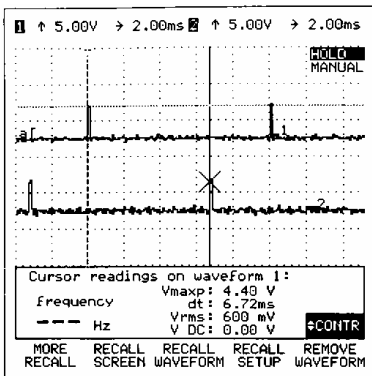
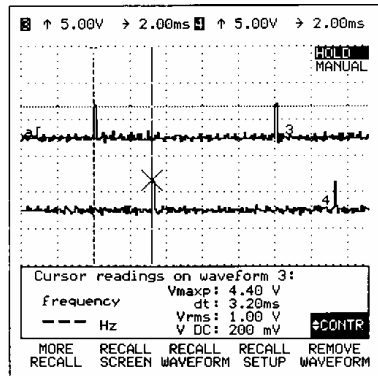


Fig.5.10. Structura sistemului comandat cu microcontroler.



a)



b)

Fig.5.11. Impulsurile de sincronizare pentru fazele:
a) R(1) și T(2); b) R(3) și S(4).

5.4. Sistem de încălzire echipat cu motoare asincrone monofazate și variator de tensiune alternativă

Studiu de caz

Încălzirea electrică prezintă câteva avantaje importante față de alte soluții de încălzire a depozitelor, a spațiilor industriale cu volum mare, printre care se menționează comanda flexibilă și monitorizarea consumului de energie și a stării de funcționare.

5.4.1. Structura sistemului SIR DUNA 2000

Sistemul (fig.5.12) se compune din mai multe subsisteme distribuite în volumul care trebuie încălzit. Fiecare subsistem (fig.5.13) se compune dintr-un element de încălzire cu coeficient de temperatură pozitiv, un ventilator antrenat de un motor electric, un variator de tensiune alternativă și un traductor de temperatură.

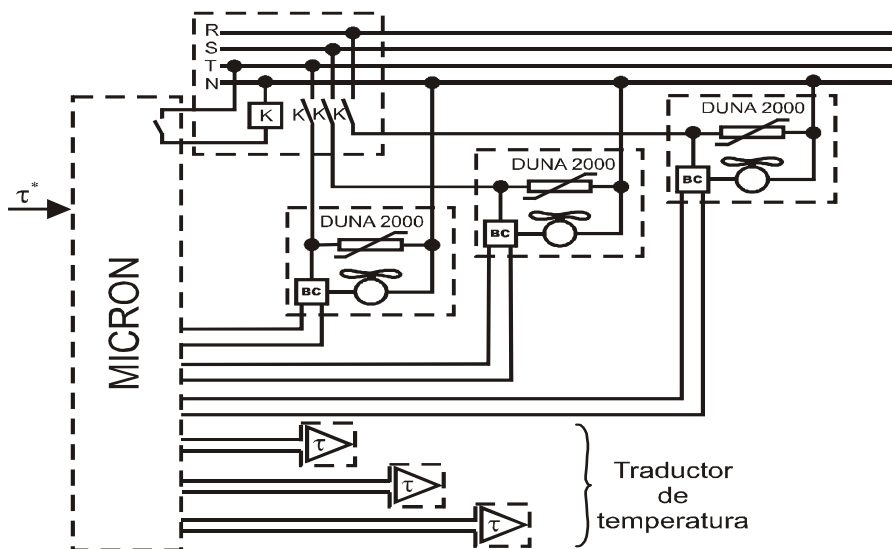


Fig.5.12. Structura sistemului de încălzire SIR DUNA 2000.

unde:

- K- contactor de cuplare la rețea a unităților de încălzire DUNA 2000;
- BC - bloc de comandă a vitezei motorului de antrenare a ventilatorului;
- MICRON - automat programabil;
- τ^* - temperatura prescrisă pentru volumul încălzit;
- τ - temperatura în zona controlată.

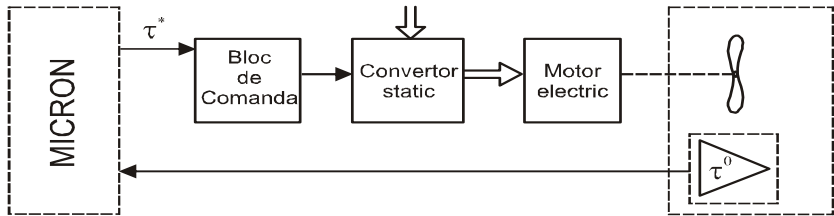


Fig.5.13. Structura subsistemului de încălzire.

Puterea electrică a elementului de încălzire poate fi reglată între 800 și 2000 W prin modificarea debitului de aer vehiculat de ventilator între 20 și 150 m³/h (fig.5.14).

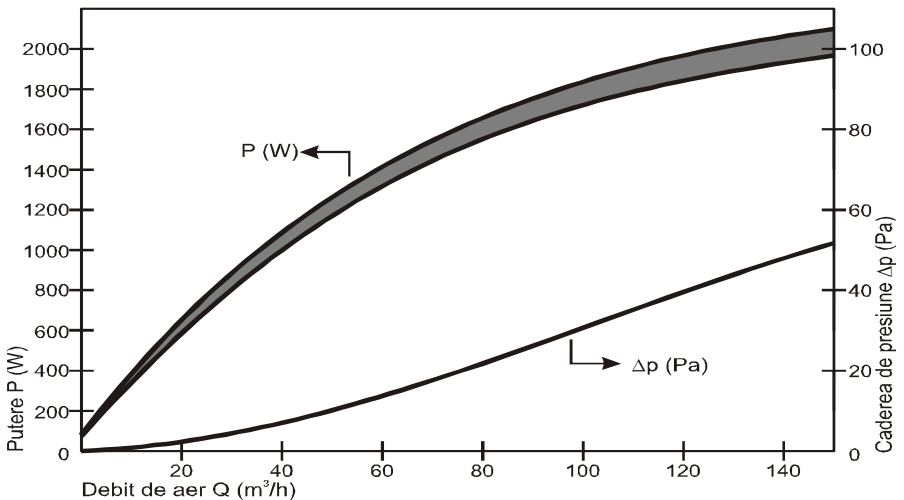


Fig.5.14. Caracteristica statică a elementului de încălzire.

Această modificare este realizată prin reglarea turației motorului de antrenare a ventilatorului prin intermediul blocului BC, de fapt un variator de tensiune alternativă, care modifică valoarea medie a tensiunii de alimentare a motorului. Așadar, puterea electrică de încălzire de valoare mare (2 kW) poate fi reglată continuu prin comanda motorului de 50 W care antrenează ventilatorul.

Comanda turației motorului este asigurată centralizat (fig.5.12) de o arhitectură cu microcontroler MICRON în funcție de temperatura măsurată în zona în care este amplasat elementul de încălzire. Automatul MICRON asigură și alte funcții printre care cuplarea/decuplarea de la rețeaua electrică a elementelor de

5.4.2. Algoritmul de comandă

a) Algoritmul de comandă al sistemului de acționare (fig.5.15)

Automatul MICRON (fig.5.16) măsoară temperatura în fiecare zonă și o compară cu temperatura impusă. În funcție de rezultat ia decizia de creștere sau scădere a turației ventilatorului adică de creștere sau scădere a puterii disipată de fiecare element de încălzire.

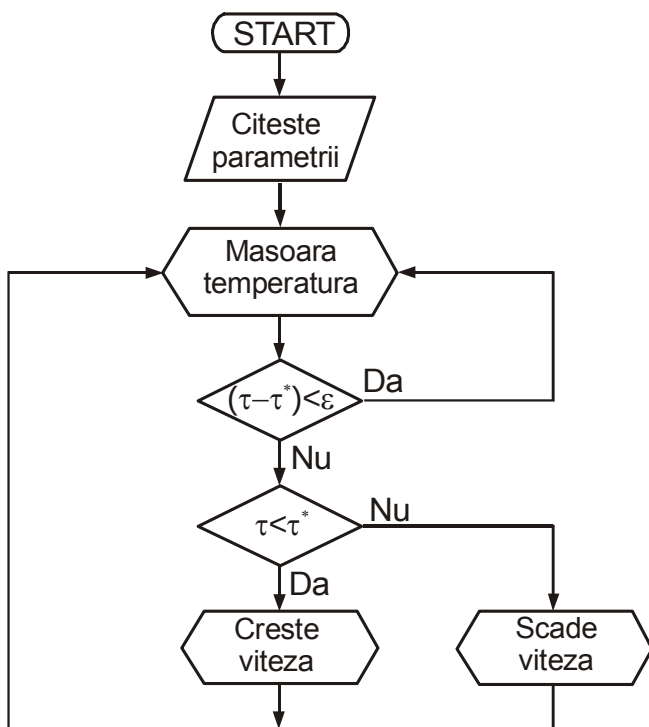


Fig. 5.15. Schema logică pentru comanda acționării ventilatorului.



Fig.5.16. Vedere de ansamblu a automatului MICRON în aplicația AUTOLUM.

b) Algoritmul de comandă al variatorului de tensiune alternativă

Reglarea tensiunii de alimentare a motorului este realizată cu o schemă originală (fig.5.17).

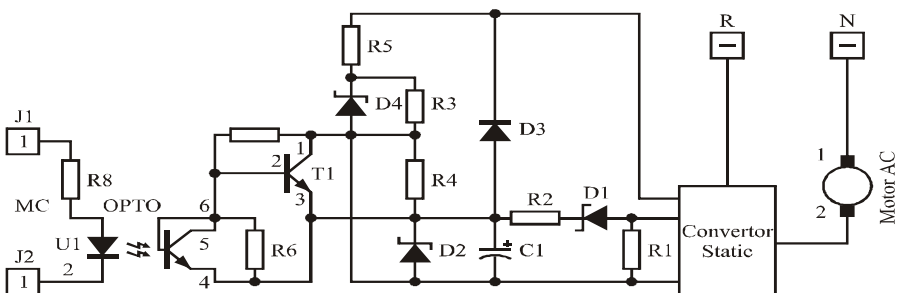


Fig.5.17. Schema electrică a sistemului de acționare

Automatul MICRON furnizează un tren de impulsuri cu factor de umplere variabil în funcție de temperatura dorită (fig.5.18).

$$FU\% = \frac{t_1}{t_1 + t_2} \cdot 100$$

unde : t_1 - intervalul de timp în care semnalul de comandă are valoarea "1";

t_2 - intervalul de timp în care semnalul de comandă are valoarea "0";

Optocuplorul OPTO asigură separarea galvanică dintre automatul

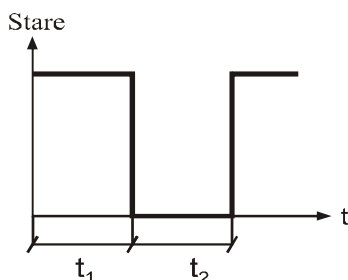


Fig.5.18. Forma semnalului de comandă.

MICRON și partea de forță a sistemului, iar grupul R_3, R_5, R_6, R_8 și T_1 transformă trenul de impulsuri în curent de încărcare al condensatorului C_2 . Astfel timpul de încărcare al condensatorului, respectiv unghiul de întârziere a comenzii variatorului de tensiune alternativă, depinde de factorul de umplere al trenului de impulsuri α .

Programul de comandă are două părți: o parte de elaborare a comenzii ventilatorului în funcție de temperatura impusă și a doua parte care asigură comanda propriu-zisă a ventilatorului. Ținând seama de necesitatea asigurării comenzii în timp real, de constanta de timp a procesului și pentru a avea un preț redus al produsului, se folosește un microcontroler cu frecvența de ceas de 24MHz care generează 8 semnale cu frecvența de 3,3 kHz și factor de umplere variabil (fig. 5.19) în 10 pași.

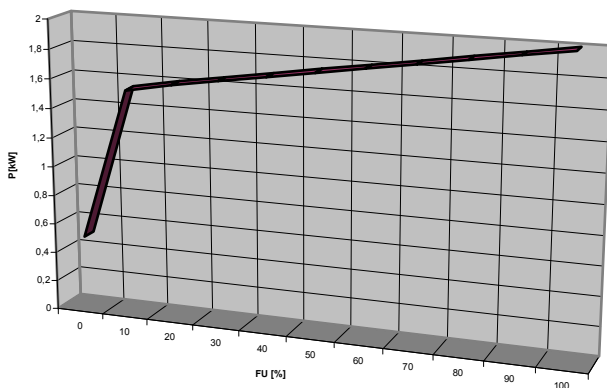


Fig.5.19. Dependenta dintre puterea disipată și factorul de umplere al semnalului de comandă.

Sistemul este utilizat de mai mulți ani pentru încălzirea unui depozit de margarină cu un volum de $1500m^3$. Se folosesc 20 de subsisteme DUNA 2000, cu gabarit foarte mic ($10 \times 12 \times 12 cm^3$) (fig.5.20), pentru a asigura menținerea

temperaturii între 6 și 9°C în ipoteza că temperatura exterioară este de -15°C, iar atingerea temperaturii de regim trebuie asigurată în două ore pornind de la -15°C. Se observă (fig.5.21) că în primul ciclu de funcționare (care durează 2 ore) toate sursele de căldură rămân conectate și debitează puterea maximă, iar apoi se comandă reducerea sau creșterea puterii degajate la intervale mai scurte dependente de temperatura reală din depozit.

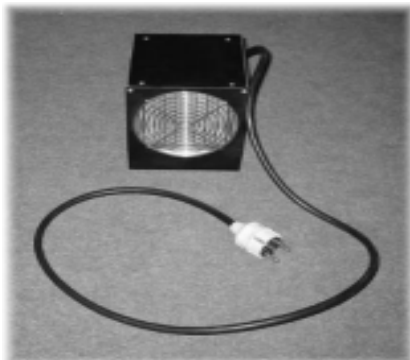


Fig.5.20. Vedere de ansamblu a subsistemului DUNA 2000.

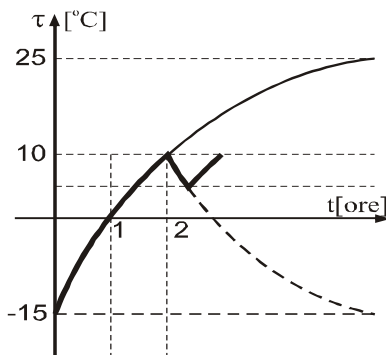


Fig.5.21. Creșterea temperaturii în primul ciclu de funcționare.

Se observă (fig.5.22) că semnalele de la ieșirea automatului au formă dreptunghiulară, aproape identică cu forma teoretică prezentată în fig.5.18, că frecvența semnalului se păstrează (3 div x 300 μs, adică 3,3 kHz), iar factorul de semnal se modifică în plaja 0,07 ... 0,5 ... 0,9.

De asemenea (fig.5.23), corespunzător acestor semnale, valoarea medie a tensiunii aplicate motorului este de 96V, 168V și respectiv 200V așa cum se observă și din textul scris automat de aparatul cu care s-au făcut oscilografierile.

Aceste rezultate confirmă că soluția propusă este utilă pentru aplicațiile particulare evocate: încălzirea depozitelor, a spațiilor industriale cu volum mare.

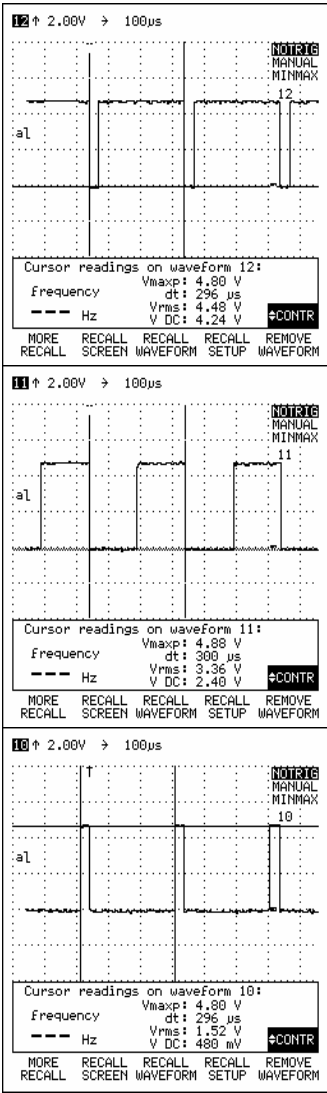


Fig.5.22. Forma semnalelor de comandă la ieşirea din automat.

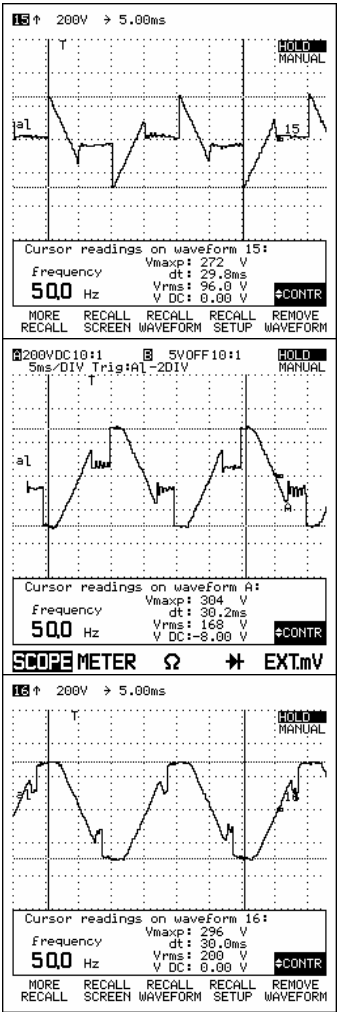


Fig.5.23. Forma tensiunii de alimentare a motorului.

6. SISTEME CU MOTOARE ASINCRONE CU ROTOR BOBINAT PENTRU REGLAREA VITEZEI PRIN MODIFICAREA ENERGIEI DE ALUNECARE

În cazul sistemelor de acționare de putere mare, alimentate cu tensiunea de 6kV se utilizează, pentru reglarea vitezei, metode bazate pe modificarea energiei transferate circuitului rotorului deoarece tensiunea de lucru este, evident, mai mică.

După principiul de funcționare se disting două categorii de sisteme:

- sisteme de reglare a vitezei prin recuperarea energiei de alunecare,
- sisteme de reglare a vitezei prin disiparea energiei de alunecare.

O categorie specială o reprezintă sistemele pentru funcționarea sincronă - cunoscute sub numele de arbore electric - care, pot fi concepute ca sisteme în circuit deschis, asigurând o adaptare în funcție de diferența dintre cuplurile rezistente.

6.1. Sisteme pentru reglarea vitezei prin disiparea energiei de alunecare

Structura acestora se obține prin utilizarea unei acționări cu motor asincron cu rotor bobinat având o rezistență fixă, iar modificarea acesteia se face cu un contactor static (fig.6.1). Contactorul este comandat, spre exemplu, cu frecvență constantă și factor de semnal sau de umplere variabil (fig.6.2).

$$\alpha = \frac{t_1}{t_1 + t_2} = \frac{t_1}{t_c} \quad (6.1)$$

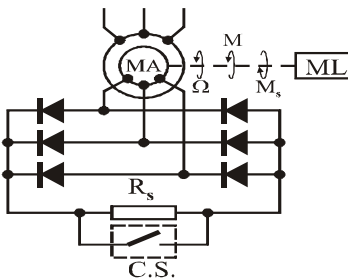


Fig.6.1. Principiul sistemului de acționare bazat pe disiparea energiei de alunecare.

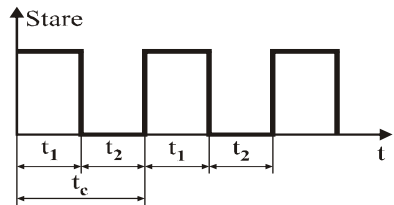


Fig.6.2. Principiul de comandă al contactorului static.

Rezistența medie din circuitul rotoric este:

$$R_{2\text{ med}} = (1 - \alpha) R_{2s} \quad (6.2)$$

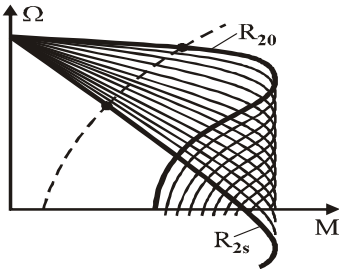


Fig.6.3. Caracteristicile statice ale sistemului.

Se observă că pentru factor de semnal $\alpha=1$, rezistența este scurtcircuitată tot timpul

$$R_{2\text{ med}}=0 \quad (6.3)$$

iar pentru $\alpha=0$, rezistența rămâne tot timpul în circuit

$$R_{2\text{ med}}=R_{2s} \quad (6.4)$$

iar sistemul va funcționa pe caracteristici reostatice (fig.6.3) cuprinse între caracteristica mecanică naturală și cea corespunzătoare rezistenței maxime.

Structura sistemului este prezentată în fig.6.4 și se observă că partea de comandă este asemănătoare cu cea utilizată pentru sistemele de acționare realizate cu variatoare de tensiune continuă pentru că, de fapt, VTC-ul este un contactor static.

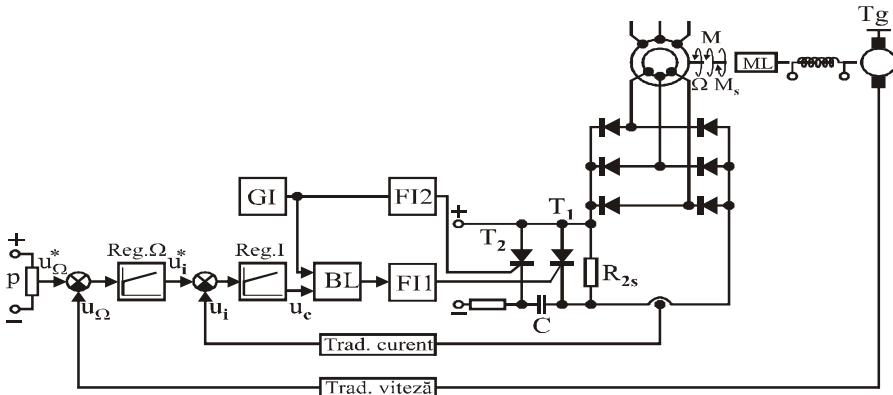


Fig.6.4. Structura sistemului de acționare realizat cu un contactor static în curent continuu.

6.2. Sisteme pentru reglarea vitezei prin recuperarea energiei de alunecare

Reglarea reostatică a vitezei acționărilor de putere mare (1...10 MW) este neeconomică, pierderile pe rezistența suplimentară fiind jumătate din puterea absorbită, iar utilizarea altor soluții nu este posibilă datorită tensiunii mari cu care este alimentat motorul electric de acționare. În aceste cazuri se utilizează metode bazate pe recuperarea energiei de alunecare din circuitul rotoric.

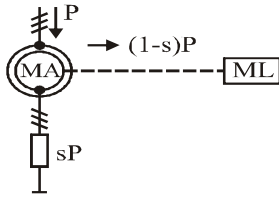


Fig.6.5. Transferul puterilor la acționarea cu motor asincron.

Se știe că puterea electromagnetă transferată rotorului are două componente (fig.6.5):

- o componentă corespunzătoare puterii mecanice

$$P_{mec} = (1-s)P \quad (6.5)$$

- o componentă corespunzătoare puterii de alunecare

$$P_{22} = sP \quad (6.6)$$

care poate fi recuperată fie ca putere mecanică, fie ca putere electrică, rezultând două variante de sisteme de acționare.

6.2.1. Sisteme pentru reglarea vitezei la putere constantă

Dacă puterea de alunecare este transformată în energie mecanică (fig.6.6) și readusă la arborele motorului atunci, în ipoteza că randamentul elementelor componente este unitar, puterea transferată mașinii de lucru

$$P_{ML} = P(1-s) + sP = P \quad (6.7)$$

este egală cu puterea preluată din rețea, adică reglarea vitezei se face la putere constantă.

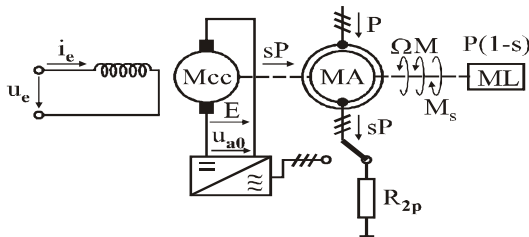


Fig.6.6. Principiul sistemului de reglare a vitezei la putere constantă.

Considerând sistemul ca obiect orientat (fig.6.7) rezultă că mărimea de comandă este curentul de excitație al motorului de curent continuu care are rolul de a transforma puterea electrică de alunecare în putere mecanică.

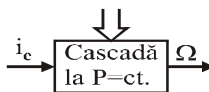
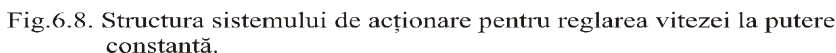


Fig.6.7. Sistemul de acționare ca obiect orientat, $P=ct.$



Tensiunea electromotoare la bornele mașinii de recuperare, antrenată de motorul asincron:

Tinând seama că: $\phi=k_2 i_e$ iar $\Omega=\Omega_0(1-s)$, (6.9)

rezultă:

respectiv:

$$\begin{aligned} E &= k_1 k_2 i_e \Omega_0 (1-s), \\ E &= k i_e (1-s). \end{aligned} \quad (6.11)$$

Tensiunea la bornele redresorului necomandat:

$$U_{d0} = \sqrt{2} s E_{20} \frac{6}{\pi \sqrt{3}} \sin \frac{\pi}{6}, \quad (6.12)$$

unde E_{20} este tensiunea de linie din circuitul rotoric.

În ipotezele considerate:

$$E=U_{d0}, \quad (6.13)$$

respectiv:

$$k(1-s)i_e = \sqrt{2}sE_{20} \frac{6}{\pi\sqrt{3}} \sin \frac{\pi}{6}. \quad (6.14)$$

În final rezultă că:

$$\Omega = \frac{\Omega_0}{1 + \frac{ki_e}{\frac{\sqrt{6}}{\pi} E_{20}}}, \quad (6.15)$$

adică viteza sistemului Ω depinde de curentul de excitație al mașinii de recuperare $\Omega=f(i_e)$ care este mărime de comandă pentru partea de forță.

Din analiza relației (6.15) rezultă că pentru $i_e=0$, viteza acțiunii $\Omega=\Omega_0$, deci motorul funcționează pe caracteristica mecanică naturală.

Pentru $i_e>0$, viteza acțiunii, pentru $M_s=0$, este sub viteza de sincronism (fig.6.9). Așadar reglarea vitezei este monozonală, sub caracteristica mecanică naturală, iar caracteristicile mecanice își păstrează forma tipică.

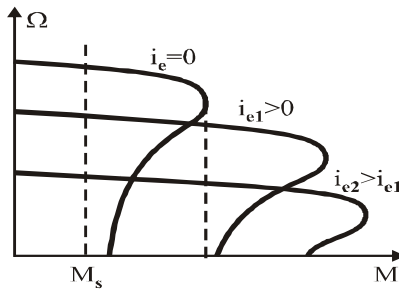


Fig.6.9. Caracteristicile mecanice ale sistemului de acțiune pentru reglarea vitezei la $P=ct$.

Alegerea elementelor componente ale sistemului

Motorul asincron principal se alege după metodologia cunoscută, iar puterea mașinii de recuperare se alege în funcție de gama de reglare a vitezei.

Dacă:

$$\Omega_{\min}=0,5\Omega_0,$$

atunci,

$$s_{\max}=0,5.$$

Puterea mașinii de recuperare

$$P_{MR} = s_{\max} P_M. \quad (6.16)$$

Dimensionarea redresorului necomandat se face ținând seama că frecvența tensiunii de alimentare este variabilă:

$$f_{\min} = 0,5 s_N f_1, \quad (6.17)$$

$$f_{\max} = s_{\max} f_1, \quad (6.18)$$

unde:

s_N – alunecarea nominală a motorului principal,

f_1 – frecvența nominală a motorului principal.

Analiza curentului din circuitul de recuperare

Studiu de caz

În sistemele industriale comutarea circuitului rotoric pe rezistența de pornire, respectiv pe circuitul de recuperare se face automat.

Aceasta înseamnă că punerea în funcțiune a sistemului se face în două etape :

- etapa 1 - pornirea reostatică,
- etapa 2 - reglarea vitezei.

Pornirea reostatică automată se face după reguli cunoscute, cu mențiunea că se acceptă comanda de START dacă $u_r^* = 0$.

După încheierea regimului tranzitoriu la pornire, circuitul rotoric este conectat automat pe circuitul de recuperare iar sistemul funcționează pe caracteristica mecanică naturală sau apropiată de aceasta. De asemenea, la scăderea turației sub valoarea minimă, spre exemplu $0,5\Omega_0$, respectiv la creșterea alunecării peste $0,5$, circuitul rotoric este recuplat pe rezistența rotorică.

În aceste condiții se pune problema analizei curentului din circuitul de recuperare la funcționarea staționară și în regim tranzitoriu.

Se observă (fig.6.10) că la funcționarea în apropierea caracteristicii mecanice naturale, curentul este puternic deformat datorită redresorului necomandat, iar frecvența fundamentalei este de 1,124Hz.

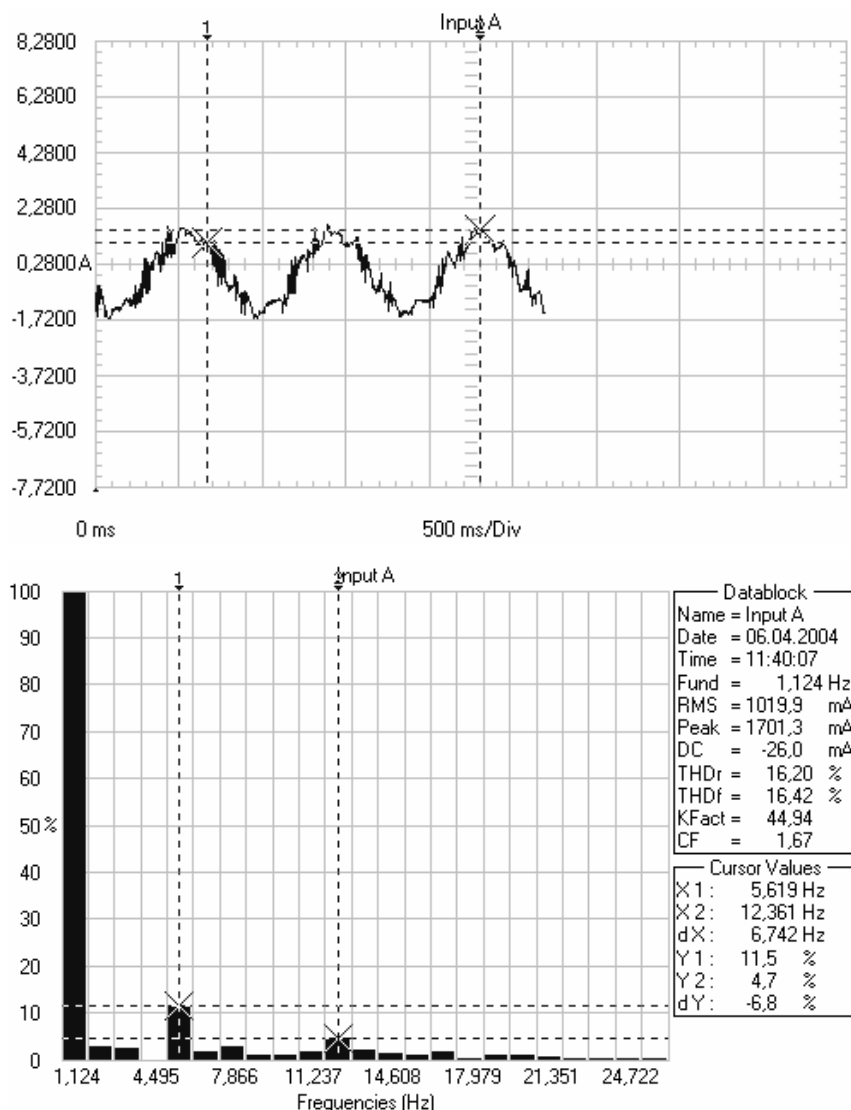


Fig.6.10. Curentul alternativ din circuitul de recuperare la funcționarea în apropierea caracteristicii mecanice naturale.

6.2.2. Sisteme pentru reglarea vitezei la cuplu constant

Dacă puterea de alunecare este transformată în energie electrică (fig.6.11) și readusă la rețeaua electrică primară atunci, în ipoteza că randamentul elementelor componente este unitar, puterea transferată mașinii de lucru este variabilă.

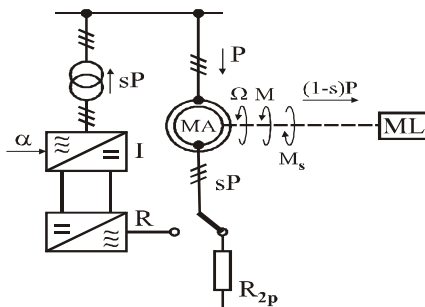


Fig.6.11. Principiul sistemului de reglare a vitezei la cuplu constant.

$$P_{ML}=P(1-s) \quad (6.19)$$

iar cuplul

$$M = \frac{P_{ML}}{\Omega} \quad (6.20)$$

este constant, adică reglarea vitezei se face la cuplu constant. Se menționează că în practică se utilizează și alte metode de conversie a puterii de alunecare cu parametri variabili, în putere ce poate fi transferată rețelei electrice primare.

Considerând sistemul ca obiect orientat (fig.6.12) rezultă că mărimea de comandă este unghiul de comandă α al invertorului I care are rolul de a transforma puterea electrică de alunecare cu frecvență variabilă în putere cu frecvență constantă, compatibilă cu frecvența rețelei.

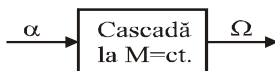


Fig.6.12. Sistemul de acționare ca obiect orientat, $M=ct.$

Și în acest caz structura sistemului (fig.6.13) conține o buclă pentru controlul curentului din circuitul de recuperare și o buclă pentru controlul vitezei.

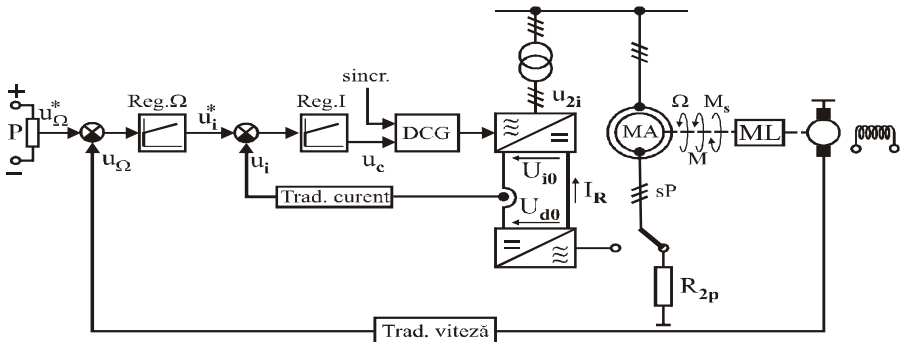


Fig. 6.13. Structura sistemului de acțiune pentru reglarea vitezei la cuplu constant.

Pentru a pune în evidență reglarea vitezei Ω prin modificarea mărimii de intrare α (fig.6.12) se consideră că $M_s=0$, iar curentul din circuitul de recuperare $I_R=0$.

Tensiunea la bornele redresorului necomandat:

$$U_{d0} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} sE_{20}. \quad (6.21)$$

Tensiunea la intrarea inverterului:

$$U_{i0} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} U_{2i} |\cos \alpha|. \quad (6.22)$$

Ținând seama că, în ipotezele considerate:

$$U_{d0}=U_{i0}$$

respectiv,

$$\frac{\sqrt{6}}{\pi} \frac{\Omega_0 - \Omega}{\Omega_0} E_{20} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} U_{2i} |\cos \alpha|. \quad (6.23)$$

De aici:

$$\Omega = \Omega_0 \left(1 - \frac{U_{2i}}{E_{20}} |\cos \alpha| \right). \quad (6.24)$$

Din analiza relației (6.24) rezultă că pentru $\alpha=90^\circ$, $\Omega=\Omega_0$ și deci sistemul funcționează pe caracteristica mecanică naturală (fig.6.14). Pentru unghiuri de comandă $\alpha>90^\circ$, viteza acțiunii, pentru $M_s=0$, este sub viteza de sincronism, reglarea vitezei este monozonală, sub caracteristica mecanică naturală iar caracteristicile mecanice își păstrează forma tipică.

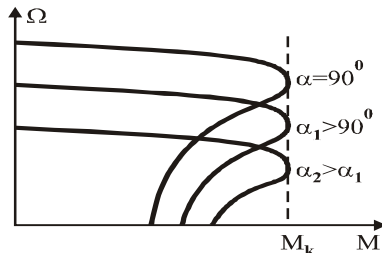


Fig. 6.14. Caracteristicile mecanice ale sistemului de acțiune pentru reglarea vitezei la $M=ct$.

7. SISTEME DE ACȚIONARE ELECTROMECHANICĂ CU MOTOARE ASINCRONE ȘI CONVERTOARE STATICE

7.1. Principiul reglării vitezei

Ținând seama de expresia turației, respectiv vitezei de sincronism:

$$\begin{aligned} n_0 &= \frac{60f_1}{p}, \\ \Omega_0 &= \frac{2\pi f_1}{p}, \end{aligned} \quad (7.1)$$

rezultă că prin modificarea frecvenței tensiunii de alimentare a motorului asincron se obține o reglare foarte bună a vitezei acționării corelat cu mai mulți indici de calitate:

- gama de reglare;
- finețea reglării;
- sensul reglajului;
- reglarea vitezei la funcționarea în gol sau cu sarcină redusă;
- randamentul reglării;
- se poate aplica motoarelor cu rotorul în scurtcircuit, mai robuste, mai fiabile, mai ieftine.

Din analiza ecuației de echilibru a tensiunii pe o fază statorică

$$\underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + jL_1 \omega \underline{I}_1 + j\omega w_1 k_{w1} \underline{\phi} \quad (7.2)$$

rezultă că, dacă se neglijează primii doi termeni, atunci :

$$\underline{U}_1 \approx 4,44f_1 w_1 k_{w1} \underline{\phi}$$

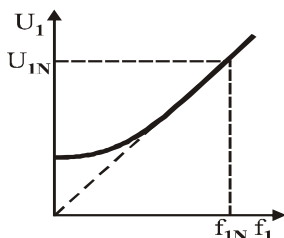


Fig.7.1. Dependența $U_1=f(f_1)$.

Pentru ca inducția magnetică B să rămână constantă (de ordinul 1,25T), indiferent care este frecvența de alimentare, este necesar ca fluxul ϕ să rămână constant, adică valoarea eficientă a tensiunii trebuie să fie proporțională cu frecvența

$$U_1 = kf_1 \quad (7.3)$$

Totuși, la viteze reduse căderea de tensiune $R_1 I_1$ este comparabilă cu tensiunea U_1 și de aceea este necesară corecția legii de proporționalitate (fig.7.1).

7.2. Ecuația caracteristicii mecanice

Ținând seama de expresia cuplului electromagnetic:

$$M = \frac{3U_1^2}{\Omega_0} \cdot \frac{\frac{R_2'}{s}}{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2}')^2}, \quad (7.4)$$

respectiv:

$$M = \frac{3U_1^2}{\Omega_0} \cdot \frac{\frac{R_2'}{s}}{\left(\frac{R_2'}{s}\right)^2 + X^2} \quad (7.5)$$

și făcând substituțiile:

$$\Omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p},$$

$$s = \frac{\Omega_0 - \Omega}{\Omega_0} = \frac{\frac{2\pi f_1}{p} - \Omega}{\frac{2\pi f_1}{p}} = \frac{2\pi f_1 - p\Omega}{2\pi f_1},$$

$$U_1 = k f_1,$$

$$X = 2\pi f_1 L,$$

se obține:

$$M = \frac{3pk^2 f_1^2}{2\pi f_1} \cdot \frac{\frac{2\pi f_1 R_2'}{2\pi f_1 - p\Omega}}{\left(\frac{2\pi f_1 R_2'}{2\pi f_1 - p\Omega}\right)^2 + 4\pi^2 L^2 f_1^2}, \quad (7.6)$$

respectiv:

$$M = \frac{3pk^2}{2\pi} \cdot \frac{\frac{R_2'}{f_1 - p\Omega}}{\frac{R_2'}{(f_1 - p\Omega)^2} + 4\pi^2 L^2}. \quad (7.7)$$

Din analiza acestei relații rezultă că se conservă forma tipică a caracteristicii mecanice iar pentru f_1 variabil și pentru $U_1/f_1=k$ caracteristicile mecanice sunt paralele între ele (fig.7.2).

Considerând expresia simplificată a curentului statoric:

$$I_1 = \frac{U_1}{jX_m} + \frac{U_1}{\frac{R_2'}{s} + jX} \quad (7.8)$$

și operând aceleași modificări rezultă:

$$I_1 = \frac{kf_1}{j2\pi f_1 L_m} + \frac{kf_1}{\frac{R_2' f_1}{f_1 - p\Omega} + j2\pi L f_1}, \quad (7.9)$$

Fig.7.2. Caracteristicile mecanice pentru $f_1=\text{var}$ și $U_1/f_1=\text{ct}$.

$$I_1 = \frac{k}{j2\pi L_m} + \frac{k}{\frac{R_2'}{f_1 - p\Omega} + j2\pi L}. \quad (7.10)$$

Din analiza acestei relații rezultă că dacă $U_1/f_1=\text{ct}$, respectiv $f_1-p\Omega=\text{ct}$, curentul absorbit de motor la viteze diferite, dar la același cuplu, se conservă (fig.7.3).

Pentru frecvențe $f_1 > f_{1N}$ trebuie ca $U_1 > U_{1N}$, dar practic tensiunea nu poate fi crescută și de aceea cuplul maxim dezvoltat de motor scade, iar caracteristicile sunt din ce în ce mai înclinate pentru frecvențe crescătoare (fig.7.4).

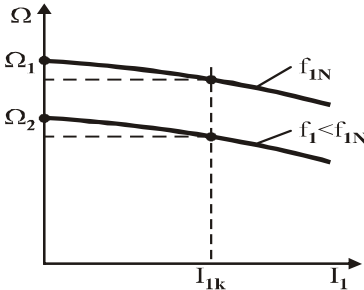


Fig.7.3. Caracteristica electromecanică $\Omega=f(I_1)$ pentru $f_1=\text{var}$ și $U_1/f_1=\text{ct}$.

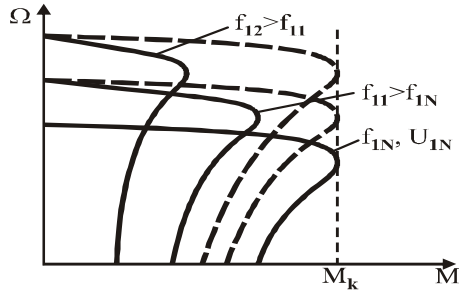


Fig.7.4. Caracteristicile mecanice pentru $f_1 > f_{1N}$.

7.3. Structura părții de forță a sistemelor de acțiune cu motoare asincrone și convertoare statice

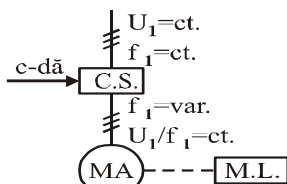


Fig.7.5. Schema de principiu a sistemului în circuit deschis.

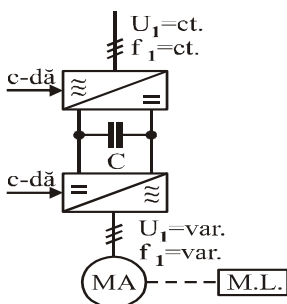


Fig.7.6. Sisteme cu circuit intermediar de tensiune continuă variabilă.

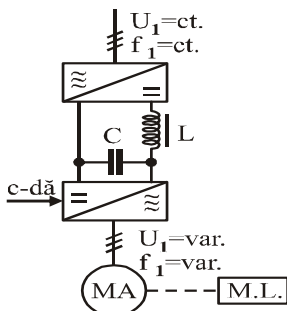


Fig.7.7. Sisteme cu circuit intermediar de tensiune continuă constantă.

Așadar, pentru reglarea vitezei este necesar ca între rețeaua electrică primară și motor să se interpună un convertor static care să transforme energia de parametri constanți $U_1=ct$, $f_1=ct$ în energie cu parametri variabili $f_1=variabil$, $U_1/f_1=ct$. Transformarea se poate face direct (cicloconvertoare) (fig.7.5) sau trecând printr-o fază intermediară de curent continuu.

În al doilea caz se pot întâlni următoarele soluții:

- reglarea frecvenței se face la nivelul invertorului iar reglarea tensiunii la nivelul redresorului: acestea sunt sistemele de acțiune cu motoare asincrone și convertoare statice cu circuit intermediar de tensiune continuă variabilă (fig.7.6);
- reglarea frecvenței și tensiunii se face la nivelul invertorului: acestea sunt sistemele de acțiune cu motoare asincrone și convertoare statice cu circuit intermediar de tensiune continuă constantă (fig.7.7).

În funcție de valorile condensatorului C și inductivității L , sursa de curent continuu poate avea caracter de sursă de tensiune sau sursă de curent. Pentru puteri până la 3kW,

redresorul poate fi monofazat.

Pentru îmbunătățirea performanțelor sistemului (factor de putere, randament), pentru adaptarea acestora la tensiuni medii, se utilizează și alte tipuri de structuri.

Una dintre acestea, cunoscută sub numele de «structura cu trei nivele» conține două punți redresoare și două invertoare (fig.7.8).

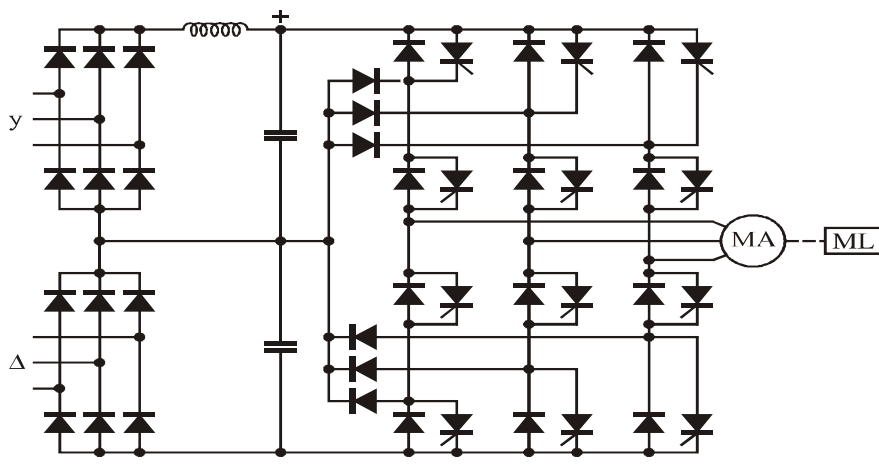


Fig.7.8. Structura sistemului cu trei nivele.

7.4. Sisteme de acțiune cu motor asincron și convertor static cu circuit intermediar de tensiune continuă variabilă

Pornind de la structura părții de forță (fig.7.6) rezultă că aceeași mărime prescrisă pentru viteză trebuie să comande atât redresorul cât și inverterul astfel încât fluxul să rămână constant.

7.4.1. Comanda la $U/f=ct$

S-a arătat că această condiție este realizată dacă se asigură corelarea dintre tensiune (comanda redresorului) și frecvență (comanda inverterului). Rezultă că structura sistemului (fig.7.9) conține o substructură specifică pentru comanda unui redresor și o substructură de comandă a inverterului.

Mărima prescrisă pentru viteză are semnificația vitezei de sincronism

$$u_{\Omega}^* \equiv \Omega_0^* = \frac{2\pi f_1}{p} \quad (7.11)$$

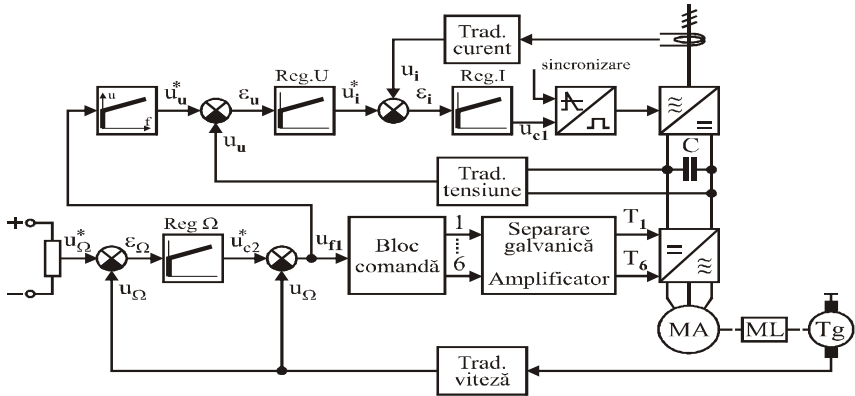


Fig.7.9. Structura sistemului de acțiune electromecanică cu motor asincron și convertor static cu circuit intermediar de tensiune continuă variabilă.

La intrarea regulatorului de viteză se obține o tensiune proporțională cu eroarea de viteză,

$$u_{\varepsilon\Omega} \equiv \varepsilon_\Omega \equiv \Omega_0^* - \Omega. \quad (7.12)$$

$$\text{Ținând seama de definiția alunecării } s = \frac{\Omega_0 - \Omega}{\Omega_0}, \quad (7.13)$$

$$\text{rezultă } \Omega_0 - \Omega = s\Omega_0. \quad (7.14)$$

$$\text{Deci } \varepsilon_\Omega \equiv s\Omega_0^*, \quad (7.15)$$

iar mărimea de conducere a regulatorului de viteză este proporțională cu frecvența corespunzătoare vitezei impuse și cu alunecarea sistemului.

$$u_{\varepsilon2} \equiv k_\Omega s\Omega_0^* + \frac{k_\Omega}{T_{i\Omega}} \int s\Omega_0^* dt \quad (7.16)$$

Însumând această mărime cu mărimea de reacție după viteză

$$u_{\varepsilon2} - u_\Omega \equiv s\Omega_0^* + \Omega = \Omega_0^* = \frac{2\pi f_1^*}{p} \equiv u_{f1} \quad (7.17)$$

rezultă o tensiune proporțională cu frecvența corespunzătoare vitezei impuse.

Aceasta este utilizată pentru a obține mărimea prescrisă pentru tensiunea continuă u_u^* prin intermediul blocului de transformare

$$u_u^* = f(u_{f1}).$$

Pentru a ilustra principiul de funcționare al blocului de comandă a inverterului, bloc realizat fie cu un circuit numeric specializat sau cu un microcontroler, se consideră că inverterul este realizat cu tranzistoare (fig.7.10).

Diagrama semnalelor de comandă (fig.7.11) indică intervalele în care conduc tranzistoarele, fiecare perioadă de 180 grade electrice fiind împărțită în 3 secvențe de câte 60 grade electrice.

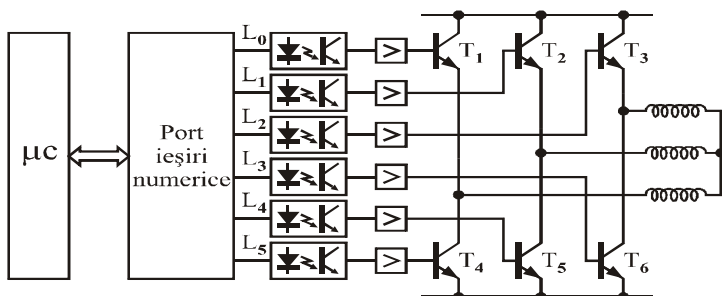


Fig.7.10. Explicativă privind blocul de comandă al inverterului.

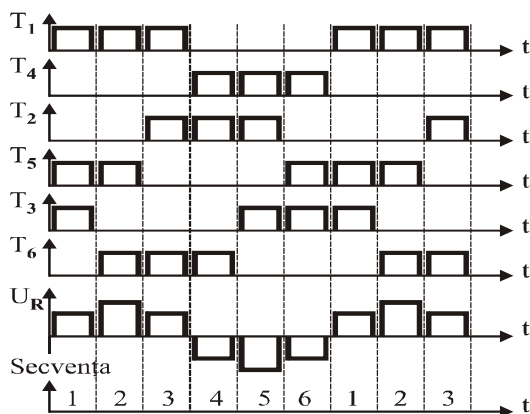


Fig.7.11. Semnalele de comandă ale inverterului și tensiunea de fază.

Pentru a evita scurtcircuite în brațele inverterului, tranzistoarele sunt blocate la sfârșitul fiecărei secvențe. Prin modificarea duratei secvențelor se reglează, de fapt, frecvența tensiunii de alimentare a motorului.

Ținând seama de secvențele de comandă (tab.7.1) algoritmul de comandă este ilustrat în fig.7.12.

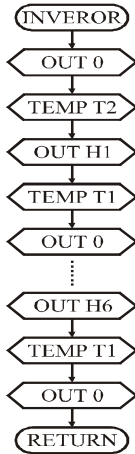


Fig.7.12. Algoritmul de comandă.

Secvența						
Stare ieșiri	1	2	3	4	5	6
L ₀	1	1	1	0	0	0
L ₁	0	0	1	1	1	0
L ₂	1	0	0	0	1	1
L ₃	0	1	1	1	0	0
L ₄	1	1	0	0	0	1
L ₅	0	0	0	1	1	1
Nr. Hexa	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅	H ₆

Prin modificarea temporizării T_1 se asigură reglarea frecvenței de comandă a inverterului.

$$f_1 = \frac{1}{6(T_1 + T_2)} \quad (7.18)$$

7.5. Sistem de acționare cu motor asincron și convertor static cu circuit intermediar de tensiune continuă constantă

Ținând seama de structura părții de forță (fig.7.7) rezultă că mărimea prescrisă se aplică numai părții de comandă a inverterului care dă la ieșire o tensiune de frecvență și valoare eficace variabilă astfel încât fluxul să rămână constant.

În teorie și practică se întâlnește o importantă diversitate de strategii de comandă și realizări tehnologice. Elementul comun îl reprezintă circuitul numeric specializat pentru comanda inverterului.

7.5.1. Sisteme în circuit deschis

Având în vedere rigiditatea caracteristicii mecanice a motorului asincron, în multe aplicații practice se preferă utilizarea sistemelor în circuit deschis, în sensul că nu există reacție după viteză (fig.7.13). O astfel de structură a fost realizată la Centrul de Inovare și Transfer Tehnologic CITT - Craiova, utilizată în mai multe tipuri de aplicații, inclusiv în activitatea didactică, denumită ACVAR 3 CA respectiv ACVAR MICRO (fig.7.14).

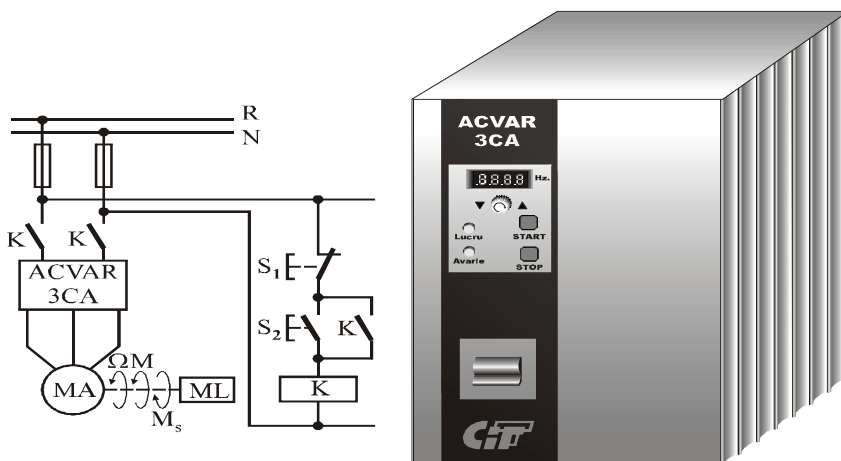


Fig.7.13. Structura sistemului în circuit deschis și vedere ACVAR 3CA

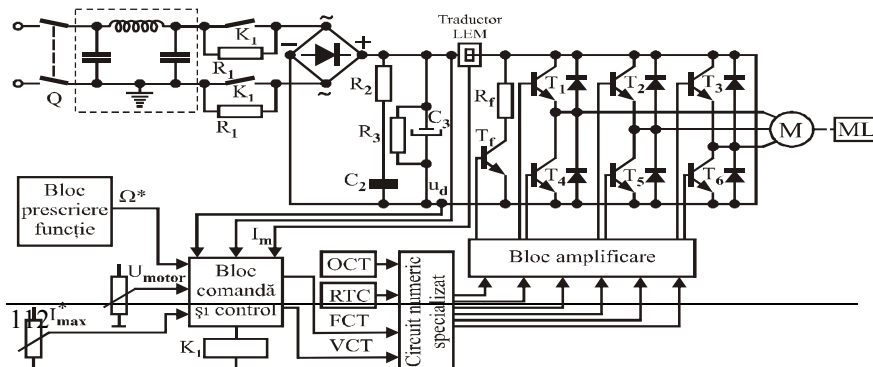


Fig.7.14. Structura sistemului de acționare ACVAR 3CA

Rezistențele R_1 au rolul de a limita curentul de încărcare a condensatorului de filtrare C_3 din circuitul intermediar. Când tensiunea U_d din circuitul intermediar a ajuns la cca $0,8U_{\max}$ blocul de control analogic comandă alimentarea bobinei contactorului K_1 care, prin contactele sale, scurtcircuitază rezistențele R_1 . În același mod se asigură protecția sistemului la scăderea tensiunii de alimentare din rețea sub valoarea admisă.

Grupul tranzistor T_f , rezistența R_f asigură frânarea motorului asincron în cazul în care sarcina dezvoltă cuplu static activ și tensiunea din circuitul intermediar depășește valoarea maximă admisă $U_{\max.ad}$.

Funcționarea circuitului numeric specializat

Pentru comanda inverterului s-au realizat diferite tipuri de circuite numerice specializate. Unul dintre acestea (HEF 4752V) realizat în tehnologie CMOS și montat într-o capsulă cu 28 pini (fig.7.15), furnizează semnale de comandă pentru modulația PWM după o lege sinusoidală a inverterului.

Circuitul conține trei numărătoare (fig.7.16), un decodor, trei etaje de ieșire și un circuit de testare după fabricare.

Cele trei etaje de ieșire corespund fazelor RST ale inverterului.

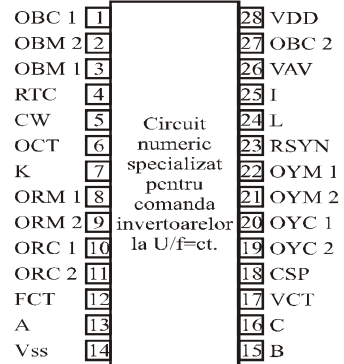


Fig.7.15. Semnificația pinilor circuitului numeric specializat.

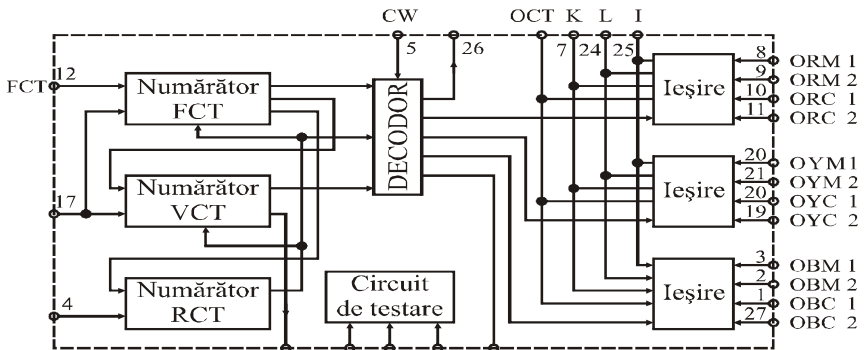


Fig.7.16. Organizarea internă a circuitului numeric specializat.

Fiecare etaj are patru ieșiri, două pentru elementele semiconductoare ale alternanțelor pozitivă și, respectiv, negativă ale fazelor, iar alte două utilizate

pentru comanda pe poartă a tiristoarelor de stingere dacă invertorul este trifazat cu tiristoare cu stingere independentă comandată cu tiristoare auxiliare.

Ieșirile fiecărui etaj, destinate dispozitivelor semiconductoare de putere ale invertorului, asigură impulsurile necesare de comandă alternativ « sus » « jos » conform principiului modulației. Pentru ca tranzistoarele să nu primească impuls simultan pe aceeași ramură este prevăzut un timp de gardă pentru separarea celor două impulsuri.

Circuitul HEF are patru intrări de tact:

- pinul 4 RCT (Reference Clock Trigger) stabilește frecvența maximă de comutare a invertorului;
- pinul 6 OCT (Output Clock Trigger) determină durata minimă permisă a impulsurilor tensiunii de ieșire;
- pinul 12 FCT (Frequency Clock Trigger) determină frecvența de alimentare a motorului și prin aceasta viteza sincronă a motorului electric;
- pinul 17 VCT (Voltage Clock Trigger) determină raportul frecvență de ieșire/tensiune de ieșire.

Numărul de pulsuri în procesul modulației, număr întreg egal cu raportul între frecvența undei purtătoare și frecvența de ieșire a invertorului, este determinat de către numărătoarele FCT și RCT prin înmagazinare în RCT a tactului semnalului de la generatorul de tact, pe o durată fixată corespunzătoare unui număr de impulsuri de tact FCT. Pentru fiecare valoare a numărului de pulsuri, decodorul are înmagazinat setul de valori.

Identificarea se face prin numărare cu tactul dat la intrarea VCT, iar mărimea modulației este invers proporțională cu mărimea de intrare VCT.

Decodorul assemblează semnalul de ieșire sub forma a trei semnale de control defazate cu 120° corespunzătoare fiecărui etaj de ieșire.

Destinațiile celorlalți pini:

- pinul 5 CW stabilește sensul de rotație al motorului; motorul își poate schimba sensul doar când semnalul FCT este oprit;
- pinii 8, 9 ORM1, ORM2 - impulsurile principale ale celor două alternanțe ale fazei R;
- pinii 10, 11 ORC1, ORC2 - impulsurile de stingere ale tiristoarelor corespunzătoare fazei R;
- pinii 22, 21 OYM1, OYM2 - impulsurile principale ale celor două alternanțe ale fazei S;
- pinii 20, 19 OYC1, OYC2 - impulsurile de stingere ale tiristoarelor corespunzătoare fazei S;
- pinii 3, 2 OBM1, OBM2 - impulsurile principale ale celor două alternanțe corespunzătoare fazei T;
- pinii 1, 27 OBC1, OBC2 - impulsurile de stingere ale tiristoarelor corespunzătoare fazei T;
- pinii 24 L, 25 I, 7 K, 13 A, 15 B, 16 C - intrări de date;

- pinul 23 RSYN - sincronizarea fazei R;
- pinul 18 CSP - tren de impulsuri cu frecvență maximă dublă față de frecvența de comutare a inverterului;
- pinul 26 VAV - tensiunea medie.

Semnalele de la ieșirea circuitului pot fi obținute în două forme: primul pentru comanda invertoarelor cu tranzistoare, iar al doilea pentru comanda invertoarelor cu tiristoare.

Cele două moduri de funcționare pot fi obținute prin nivelul logic aplicat la intrarea de date I: nivel logic «0» - inverter cu tranzistoare; nivel logic «1» - inverter cu tiristoare.

Diagrama de semnale pentru un inverter cu tranzistoare este indicată în fig.7.17. Elementele de comutare ale alternanțelor pozitive și negative ale inverterului sunt comutate alternativ, iar în timpul de gardă ambele impulsuri sunt comutate în starea «0». Pe acest timp de gardă există semnale pe ieșirile de comandă ale stingerilor.

Intrarea de date K, în asociere cu tactul OCT, permite reglarea lății acestui interval de gardă. Intrarea L permite pornirea și oprirea impulsurilor: nivel «0» toate semnalele principale și auxiliare sunt inhibitate; nivel «1» semnalele sunt activate.

Se subliniază că inhibarea are efect numai pentru semnalele exterioare, în timp ce circuitele interne generatoare continuă să funcționeze.

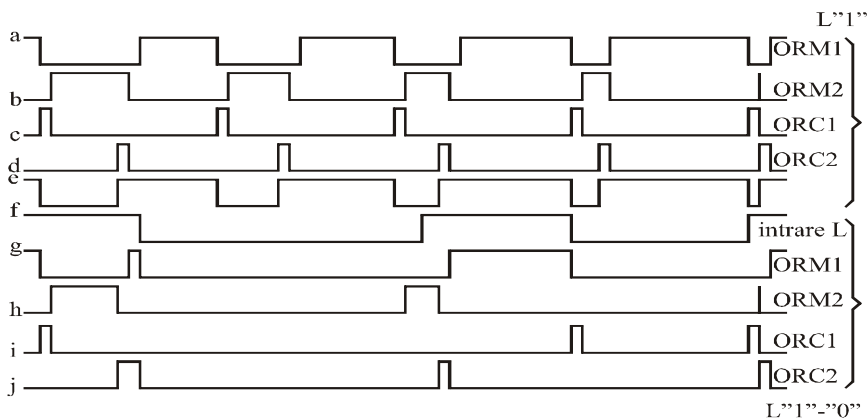


Fig.7.17. Diagrama de semnale pentru comanda unui inverter cu tranzistoare.

Frecvența FCT se calculează cu relația $(f_{FCT})_N = 3360 \times (f_{out})_N$. Ținând cont că frecvența nominală a motorului este de 50Hz, rezultă:

$$(f_{FCT})_N = 3360 \times 50 = 168000 \text{ Hz} = 168 \text{ kHz}.$$

Considerând că se dorește reglarea vitezei peste cea corespunzătoare c.m.n. se alege frecvența maximă de lucru la 100Hz.

Rezultă

$$(f_{\text{FCT}})_{\text{max}} = 3360(f_{\text{out}})_{\text{max}} = 3360 \times 100 = 336 \text{ kHz.}$$

Pentru frecvența minimă se consideră că $f_{\text{min}} = 5 \text{ Hz}$ este acoperitoare complet al reglajului de viteză.

Rezultă

$$(f_{\text{FCT}})_{\text{min}} = 3360(f_{\text{out}})_{\text{min}} = 3360 \times 5 = 16800 \text{ Hz} = 16,8 \text{ kHz.}$$

Frecvența VCT se calculează cu relația $(f_{\text{VCT}})_N = 6720 \times (f_{\text{OUT}})_N$.

Rezultă

$$(f_{\text{VCT}})_N = 6720 \times 50 = 336 \text{ kHz.}$$

Pentru realizarea căderii de tensiune IR la frecvențe joase se consideră că la frecvența minimă de 5 Hz este suficientă dublarea tensiunii față de valoarea tensiunii dată în situația nemodificării frecvenței f_{VCT} .

Rezultă

$$(f_{\text{VCT}})_{\text{min}} = 0,5 \times (f_{\text{VCT}})_N = 168 \text{ kHz.}$$

Având în vedere că invertorul este realizat cu tranzistoare, se adoptă frecvența maximă de comutație

$$f_{\text{smax}} = 1 \text{ kHz.}$$

Rezultă

$$f_{\text{RCT}} = 280 f_{\text{smax}} = 280 \text{ kHz.}$$

Pentru determinarea frecvenței f_{OCT} se notează cu τ perioada de interblocare care reprezintă intervalul cuprins între frontul descrescător al impulsului de comandă pentru tranzistorul de pe ramura minus (fig.7.18). Mărima intervalului de interblocare τ depinde de putere; pentru tranzistoarele de performanțe medii, cum este cazul tranzistoarelor românești, se lucrează cu $\tau = 20 \mu\text{s}$.

Deci

$$\tau = \frac{8}{f_{\text{OCT}}}.$$

Rezultă

$$f_{\text{OCT}} = 400 \text{ kHz.}$$

Blocul de prescriere a turației (fig.7.14) poate fi realizat cu un potențiomtru sau cu un circuit UP/DOWN (fig.7.19).

Comanda modificării frecvenței se poate realiza pe trei nivele (fig.7.20)

- cu 0,7 Hz/sec - dacă butonul de comandă este apăsat scurt;
- cu 6 Hz/sec - dacă butonul de comandă este acționat între 4 și 7 sec.;
- cu 17 Hz/sec - dacă butonul de comandă este acționat un timp mai mare de 7 sec.

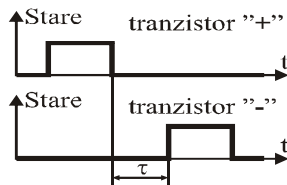


Fig.7.18. Explicativă pentru intervalul de interblocare.

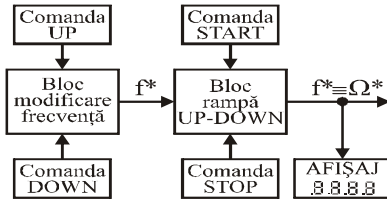


Fig.7.19. Circuit de comandă UP-DOWN.

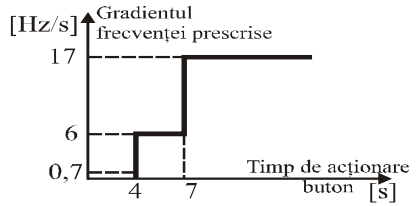


Fig.7.20. Gradientul frecvenței prescrise.

Această modalitate de comandă permite un reglaj fin al turației (primul nivel) și o atingere rapidă a turației finale. Se precizează că sistemul memorează ultima frecvență prescrisă, iar la o nouă comandă de START se ajunge automat la turația finală anterioară.

Blocul de comandă și control (fig.7.14, fig.7.21) asigură limitarea curentului prin motor și comanda modulului de frânare.

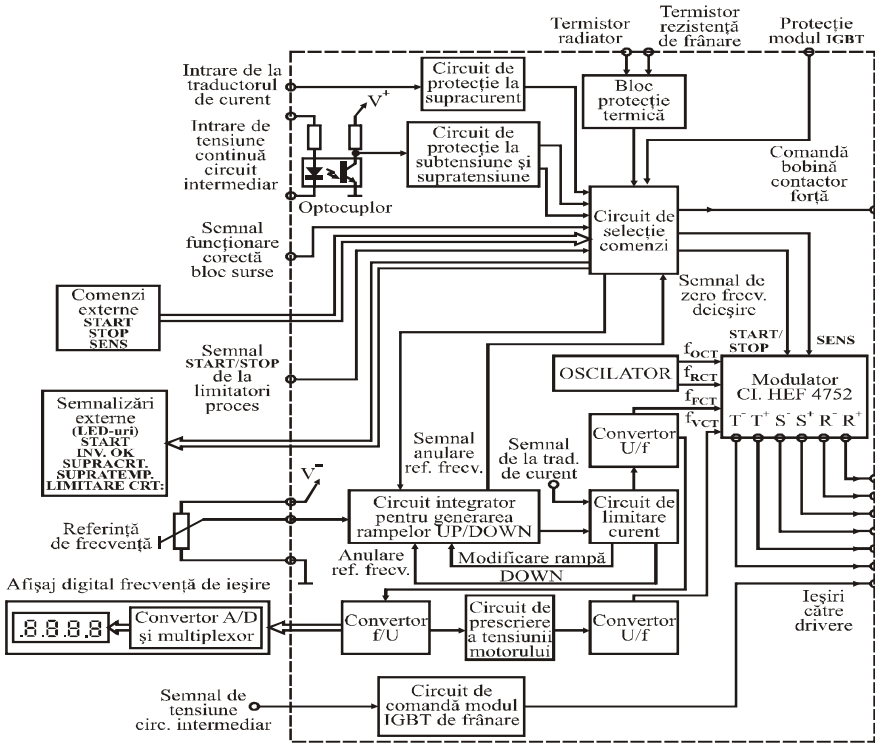


Fig.7.21. Schema bloc a circuitului de comandă și control.

Circuitul de limitare a curentului primește informații privind:

- valoarea momentană a curentului din circuitul intermediar de tensiune continuă;
 - tensiunea de la ieșirea circuitului pentru generarea rampei UP/DOWN;
- și furnizează comenzile:
- anulare referință frecvență;
 - modificare rampă DOWN pentru adaptarea la intrarea în regimul de limitare curent;
 - tensiunea de referință pentru frecvența de alimentare a motorului;

Dacă valoarea curentului prin motor este mai mică decât referința

$$I_m < I_{max} \quad (7.19)$$

frecvența prescrisă se menține la valoarea reglată.

Dacă

$$I_m > I_{max}$$

se comandă reducerea frecvenței prescrise până la îndeplinirea condiției (7.19).

La dispariția suprasarcinii, frecvența revine la valoarea prescrisă. Această funcție este utilă pentru accelerarea maselor mari și pentru obținerea unei caracteristici de excavator pentru sistemul de acționare (fig.7.22).

Circuitul pentru comanda modulului de frânare (fig.7.23) intră în funcțiune când eroarea de tensiune

$$\varepsilon = U_d - U_{d\text{ref}} \quad (7.20)$$

îndeplinește condiția:

$$\varepsilon > \varepsilon_{\text{adm}} \quad (7.21)$$

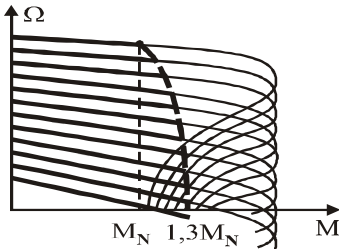


Fig.7.22. Explicativă privind caracteristica de tip excavator.

Contactorul static este realizat cu un tranzistor IGBT comandat cu o frecvență de 2 kHz, iar timpul de conducție t_1 depinde de valoarea erorii ε .

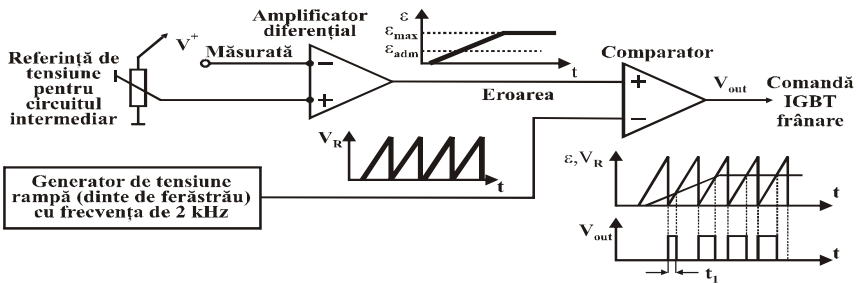


Fig.7.23. Schema bloc a circuitului de comandă a modulului de frânare.

7.5.2. Sisteme în circuit închis

Pentru creșterea performanțelor dinamice ale sistemelor de acționare cu motoare asincrone și convertoare statice, este necesară utilizarea unor bucle de reacție după turație, tensiune, curent, flux, obținându-se astfel structuri în circuit închis.

Și în acest caz, obiectivul de bază urmărit este menținerea constantă a fluxului. Deoarece acesta nu poate fi măsurat ușor s-au elaborat mai multe strategii de comandă prin care se impune fluxul:

- prin tensiunea statorică:
 - prin modulul tensiunii statorice;
 - prin componentele tensiunii statorice;
- prin curentul statoric:
 - prin modulul curentului statoric;

- prin componentele curentului statoric (în acest caz este indicat să se mențină constant fluxul rotor, obținându-se astfel metoda de reglare pe principiul orientării după câmp);

- prin moduri alunecătoare.

De asemenea, în concordanță cu teoria clasică a sistemelor de reglare automată pentru îmbunătățirea performanțelor dinamice este necesară utilizarea reguletoarelor. În teoria și practica sistemelor automate de acționare electromecanică se întâlnesc sisteme cu:

- reguletoare bipoziționale ;
- reguletoare PI multivariabile;
- reguletoare de stare multivariabile.

a) Strategii de comandă bazate pe impunerea fluxului prin modulul tensiunii statorice

Strategia constă în impunerea modulului tensiunii statorice $u_s = |u_s|$ în funcție de frecvența statorică și cea rotorică astfel încât modulul fluxului statoric să fie egal cu valoarea nominală $\phi_N = |\phi_s|$.

Această metodă conduce la circuite de comandă simple dar comportarea dinamică nu este satisfăcătoare.

Deci metoda poate fi utilizată când nu se cer performanțe deosebite în regim dinamic: acționarea pompelor, acționarea ventilatoarelor.

Se poate demonstra că tensiunea statorică

$$\underline{u}_s = \frac{1 - k_1 f_r f_s + j(k_2 f_s + k_3 f_r)}{1 + jk_4 f_r} \underline{\phi}_s k_5. \quad (7.22)$$

Modulul tensiunii statorice,

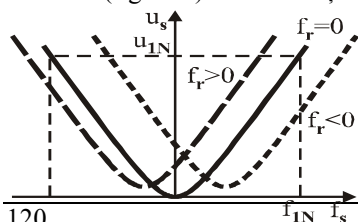
$$u_s = \phi_s k_5 \sqrt{\frac{(1 - k_1 f_r f_s)^2 + (k_2 f_s + k_3 f_r)^2}{1 + (k_4 f_r)^2}}. \quad (7.23)$$

La funcționarea în gol frecvența rotorică $f_r=0$ și

$$u_s = \phi_s k_5 \sqrt{(1 + k_2 f_s)^2}$$

pentru $(k_2 f_s)^2 > 1$, $u_s \approx f_s \phi_s$

Adică, pentru flux constant, tensiunea statorică crește liniar cu frecvența statorică (fig.7.24). Semnificația fizică a semnului frecvenței:



- $f_s > 0$ motor sens dreapta;
- $f_s < 0$ motor sens stânga;
- $f_r > 0$ motor;
- $f_r < 0$ frână.

Structura sistemului de acționare (fig.7.25) cuprinde un reglator de viteză,

Fig.7.24. Dependența tensiunii de frecvența statorică.

generatorul de funcții $u_s=f(f_s)$ conform relației (7.23) și trei blocuri de calcul BC_1 , BC_2 și BC_3 .

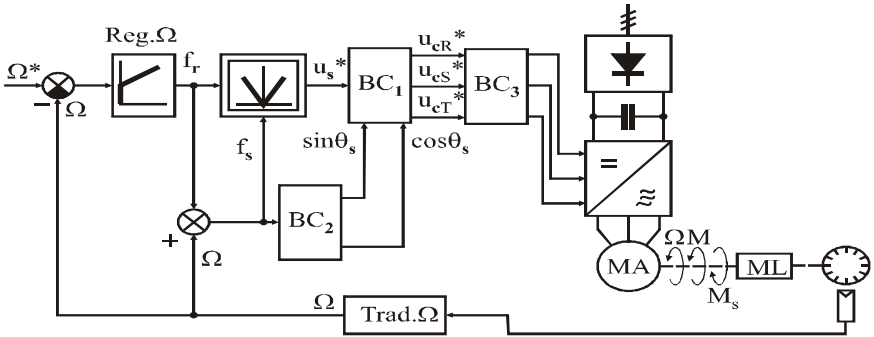


Fig.7.25. Structura sistemului de acționare.

Admițând că $\Omega^* = \Omega_0$, rezultă că:

$$\Omega^* - \Omega_0 = s \Omega_0. \quad (7.24)$$

Deci, la ieșirea din regulator se obține o mărime proporțională cu frecvența rotorică

$$s \Omega_0 = s \frac{2\pi f_s}{p} \approx f_r. \quad (7.25)$$

Se demonstrează că, la ieșirea din sumator se obține un semnal proporțional cu frecvența statorică

$$s \Omega_0 - \Omega = \Omega^* \approx f_s. \quad (7.26)$$

Având cele două mărimi f_r și f_s se poate obține modulul fazorului tensiunii statorice, iar din acesta componentele tensiunii pe fiecare fază.

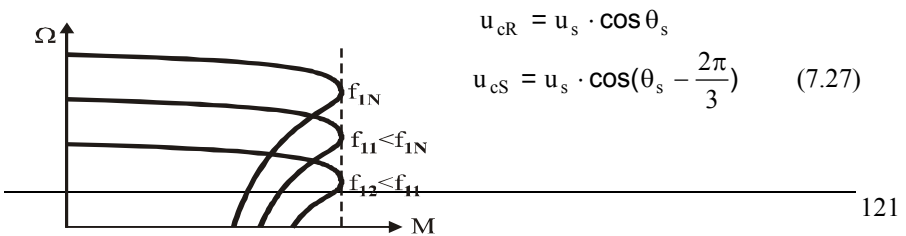


Fig.7.26. Caracteristicile mecanice.

$$u_{cR} = u_s \cdot \cos \theta_s$$

$$u_{cS} = u_s \cdot \cos\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (7.27)$$

$$u_{cT} = u_s \cdot \cos(\theta_s - \frac{4\pi}{3})$$

unde θ_s - poziția unghiulară a fazorului tensiunii statorice față de sistemul de coordonate fix

$$\theta_s = \omega_N \int f_s dt \quad (7.28)$$

$\omega_N = 2\pi f_N$ - pulsația nominală

Caracteristicile mecanice ale sistemului (fig.7.26) sunt tipice pentru cazul alimentării motorului asincron cu tensiune și frecvență variabilă și conservarea cuplului maxim.

- b) Strategii bazate pe impunerea fluxului prin modulul curentului statoric

Se poate demonstra că, pentru curentul statoric, există relația:

$$\underline{i}_s = \frac{1}{x_s} \frac{1 + jf_r k_1}{1 + jf_r k_2} \underline{\phi}_s, \quad (7.29)$$

iar modulul curentului statoric (fig.7.27)

$$i_s = \frac{\phi_s}{x_s} \sqrt{\frac{1 + (f_r k_1)^2}{1 + (f_r k_2)^2}}. \quad (7.30)$$

Fig.7.27. Dependența curentului statoric de frecvența rotorică.

Așadar, curentul statoric depinde numai de frecvența rotorică.

Structura sistemului (fig.7.28) este asemănătoare cu cea obținută prin impunerea modulului tensiunii statorice.

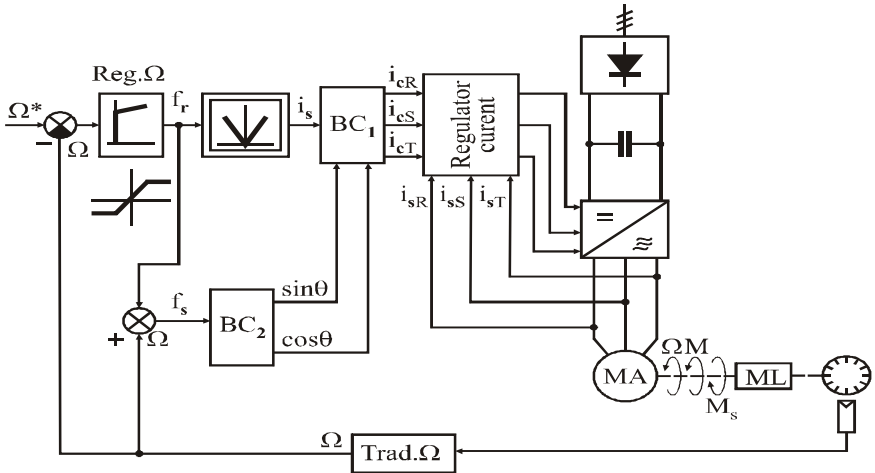


Fig.7.28. Structura sistemului de acționare.

În plus, se utilizează și un bloc al reguletoarelor de curent.

Curentul statoric este determinat în baza relației de mai sus, iar mărimile impuse pe fiecare fază se calculează cu relația:

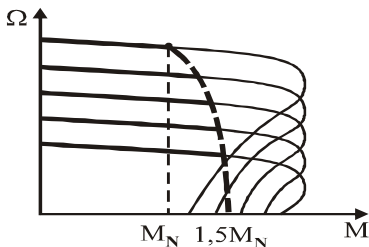


Fig.7.29. Caracteristicile mecanice.

$$i_{cR} = i_s \cdot \cos \theta_s$$

$$i_{cS} = i_s \cdot \cos\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (7.31)$$

$$i_{cT} = i_s \cdot \cos\left(\theta_s - \frac{4\pi}{3}\right)$$

Se menționează că prin limitarea semnalului la ieșirea regulatorului de viteză se limitează curentul statoric și, prin acesta, cuplul electromagnetic al motorului, obținându-se o caracteristică globală de tip excavator (fig.7.29).

Dacă reguletoarele de curent sunt de tip bipozițional (fig.7.30), se calculează pentru fiecare fază eroarea de curent:

$$\varepsilon_i = i_c - i_s \quad (7.32)$$

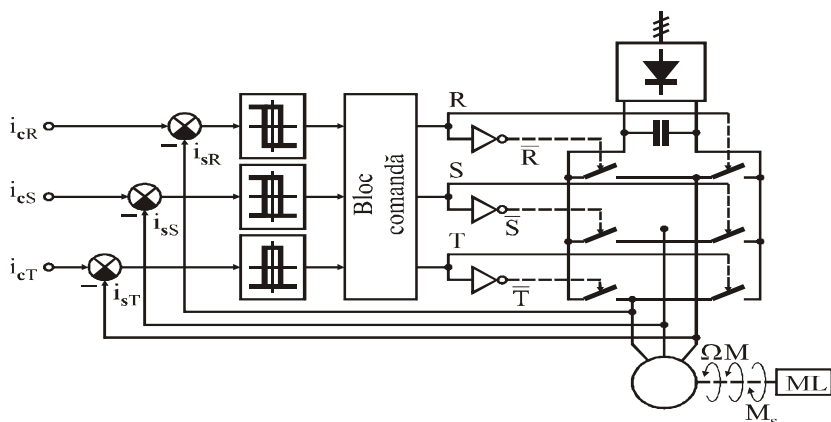


Fig.7.30. Detaliu privind reglatoarele bipoziționale de curent.

În funcție de histerezisul impus prin regulator (fig.7.31), la ieșirea acestuia se obțin semnale logice 0 sau 1 care comandă direct brațele invertorului.

De remarcat că variația curenților impuși este sinusoidală în funcție de timp (fig.7.32). Această structură se pretează pentru acțiuni de putere mică și medie.

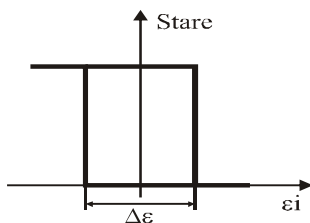


Fig.7.31. Histerezisul regulatorului de curent.

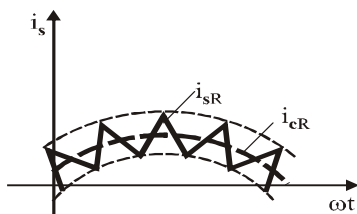


Fig.7.32. Explicativă pentru curentul pe faza R.

7.6. Structura sistemelor de acționare comandate pe principiul orientării după câmp

Sistemele electromecanice care solicită răspuns rapid și funcționare în patru cadrane, cu performanțe ridicate în apropierea turației zero, trebuie să dezvolte cuplul constant într-o gamă largă de regimuri de funcționare. În asemenea aplicații, sistemele de acționare cu motoare de curent continuu dau rezultate bune și de aceea la elaborarea principiului de comandă s-a pornit de la funcționarea motoarelor de curent continuu.

Structura părții de forță a acestor sisteme este cea clasică (fig.7.7), dar comanda este făcută cu procesoare de semnal DSP având în vedere volumul calculului numeric care trebuie efectuate pentru comanda sistemului.

Comanda vectorială presupune o decuplare între cuplul electromagnetic și flux: rotorice, statorice sau de magnetizare.

Principiul comenzii vectoriale aplicat mașinilor de curent alternativ a fost imaginat de Blaschke, către sfârșitul anilor '60, pe baza modelului matematic pus la punct de Blondel spre sfârșitul secolului XIX. Trecerea acestui principiu spre comanda numerică a început în anii '80, ținând seama de complexitatea calculului presupus de acest principiu și de dezvoltarea tehnicii de calcul - microprocesoare, microcontrolere, procesoare de semnal.

Dacă se neglijează reacția indusului și comutația, atunci motorul electric de curent continuu cu excitație separată răspunde cel mai bine principiului decuplării, respectiv comenzii vectoriale deoarece este simplu de imaginat comanda separată a curentului din indus și a curentului din inductor.

În aceste condiții cuplul electromagnetic dezvoltat de mașină este maxim având în vedere ortogonalitatea dintre flux și curentul din indus (fig.7.33).

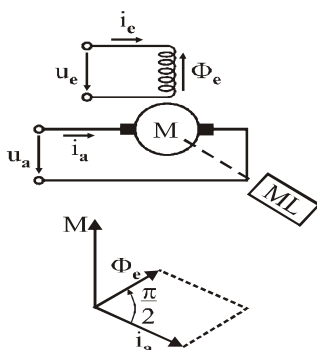


Fig.7.33. Explicativă privind cuplul dezvoltat de m.c.c.

Așadar

$$M = k \cdot \Phi \cdot i_a = k \cdot i_e \cdot i_a \quad (7.33)$$

Se subliniază că pentru mașina de curent continuu direcțiile fluxului și curentului sunt constante în timp și spațiu.

Comanda vectorială a acționărilor cu motoare de curent alternativ urmărește același obiectiv: comanda decuplată a curentului care produce fluxul și a curentului de care depinde cuplul (fig. 7.34).

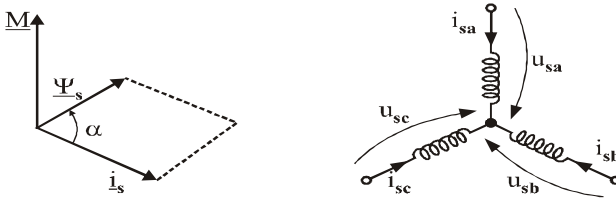


Fig. 7.34. Explicativă pentru cuplul mașinii de inducție.

Cuplul electromagnetic instantaneu al unui motor asincron poate fi exprimat acum cu ajutorul fazorului spațial. Fazorul se definește ca un vector spațial care caracterizează simultan mărimile corespunzătoare pe cele trei faze.

Astfel

- fazorul spațial al tensiunii statorice este de forma:

$$\underline{u}_s = \frac{2}{3}(\underline{u}_{sa} + \underline{a}\underline{u}_{sb} + \underline{a}^2\underline{u}_{sc}), \quad (7.34)$$

- fazorul spațial al curentului statoric este de forma:

$$\underline{i}_s = \frac{2}{3}(\underline{i}_{sa} + \underline{a}\underline{i}_{sb} + \underline{a}^2\underline{i}_{sc}), \quad (7.35)$$

respectiv fazorul spațial al fluxului statoric este de forma:

$$\underline{\psi}_s = \frac{2}{3}(\underline{\psi}_{sa} + \underline{a}\underline{\psi}_{sb} + \underline{a}^2\underline{\psi}_{sc}), \quad (7.36)$$

unde:

$\underline{i}_{sa}, \underline{i}_{sb}, \underline{i}_{sc}$ - curenții prin fazele statorului;

$\underline{\psi}_{sa}, \underline{\psi}_{sb}, \underline{\psi}_{sc}$ - fluxurile produse de curenți prin fiecare fază;

$$\underline{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}}, \quad \underline{a}^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}}.$$

Cuplul electromagnetic pentru mașina de inducție poate fi exprimat acum sub forma:

$$\underline{M} = K_m \cdot (\underline{\psi}_s \times \underline{i}_s) \quad (7.37)$$

Structura acestor sisteme de acțiune depinde de:

- mărimile de reacție controlate;
- modul în care se obțin mărimile de reacție: prin măsurare (comanda directă) sau prin calcul (comanda indirectă);
- fluxul după care se realizează orientarea după câmp: statoric, rotorice sau din întrefier;
- tipul convertorului static care alimentează motorul electric.

După modul în care se obțin mărimile de reacție se întâlnesc următoarele variante (fig.7.35):

- cu măsurarea directă a fluxului. Schemele obținute sunt mai puțin sensibile la variația parametrilor mașinii, dar măsurarea fluxului cu sonde Hall sau bobine-sondă plasate în creștăturile mașinii este complicată tehnologic. În plus, sondele Hall sunt sensibile la vibrațiile mecanice și la variația temperaturii.
- cu calcularea fluxului din curenții statorici, din tensiunea statorică și viteza rotorului. În acest caz rezultatele sunt influențate de variația rezistenței rotorice și de saturația circuitului magnetic dar prezintă avantajul că sunt eliminate traductoarele de flux. De asemenea, se obțin rezultate mai puțin precise la frecvențe sub 2 Hz deoarece căderea de tensiune devine dominantă în raport cu tensiunea electromotoare;
- cu calcularea fluxului din curenții rotorici și statorici. În acest caz rezultatele sunt influențate numai de saturația circuitului magnetic, dar metoda nu poate fi aplicată decât la mașinile asincrone cu rotorul bobinat.

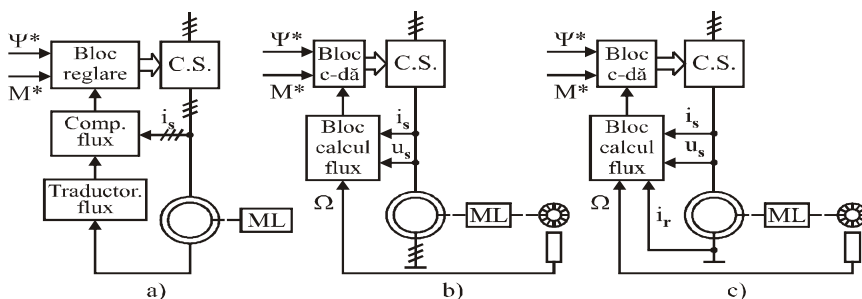


Fig.7.35. Variante de structuri ale sistemelor de acționare comandate pe principiul orientării după câmp.

Măsurarea sau calcularea - estimarea fluxului presupune determinarea amplitudinii fazorului spațial și a poziției acestuia față de un sistem de axe.

După fluxul controlat pot exista structuri cu controlul fluxului statoric, rotorice sau din întrefier. Se preferă reglarea după fluxul rotorice deoarece mărimile de reglare rezultă mai simple. Dacă se poate măsura curentul rotorice, atunci se obțin scheme mai simple dacă se calculează fluxul în întrefier. Determinarea fluxului statoric necesită calcule mai laborioase ceea ce conduce la scăderea performanțelor dinamice.

Din punct de vedere al convertorului static, principiul poate fi aplicat pentru oricare tip dar cele mai simple și mai performante scheme de comandă se obțin pentru invertoarele cu modulație în lățime (PWM).

Pentru stabilirea schemei structurale a sistemului de acționare cu motor asincron comandat pe principiul orientării după câmp se consideră următoarele:

- fazorul curentului statoric se descompune în două componente după un sistem de axe ortogonale d-q care se rotește cu viteza câmpului magnetic învârtitor (fig.7.36)

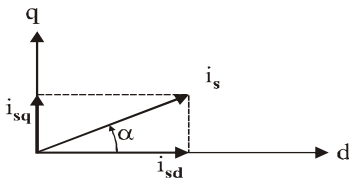


Fig.7.36. Componentele fazorului curentului statoric.

$$\begin{aligned} i_{sd} &= |i_s| \cos \alpha \\ i_{sq} &= |i_s| \sin \alpha \end{aligned} \quad (7.38)$$

- se neglijează reactanța de dispersie rotorică și rezultă că fluxul este produs de componenta reactivă a fazorului curentului statoric i_{sd} .

În aceste condiții modulul cuplului electromagnetic devine:

$$M = k_1 \cdot i_{sd} \cdot i_{sq}, \quad (7.39)$$

deci o expresie asemănătoare cu ecuația cuplului electromagnetic al mașinii de curent continuu, însă variabilele de comandă i_{sd} , i_{sq} se roteesc în spațiu. În funcție de referențialul considerat ele pot fi fixe în raport cu statorul, cu rotorul, sau în raport cu câmpul magnetic statoric.

Așadar, prin analogie cu acționarea cu motor de curent continuu, structura sistemului de acționare trebuie să conțină un bloc de calcul (fig.7.37) care are ca mărimi de intrare componentele i_{sd} și i_{sq} și care furnizează la ieșire mărimi de comandă pentru curenții din fazele statorice ale motorului.

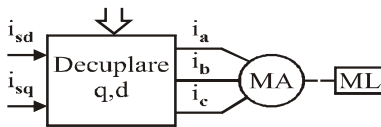


Fig.7.37. Principiul comenzii vectoriale a acționării cu motor asincron.

Pentru a ne apropia mai mult de analogia cu acționarea cu m.c.c. cu excitație separată se consideră un sistem de axe solidar cu statorul. Componentele fazorului spațial pentru curent devin (fig.7.38):

$$\begin{aligned} i_{sd}^* &= i_{sd} \cos \omega t - i_{sq} \sin \omega t \\ i_{sq}^* &= i_{sd} \sin \omega t + i_{sq} \cos \omega t \end{aligned} \quad (7.40)$$

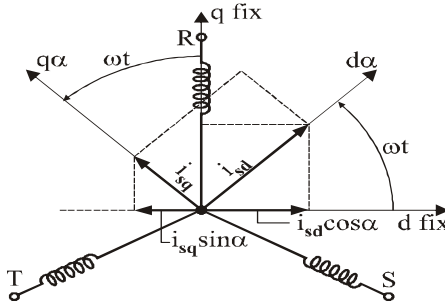


Fig.7.38. Componentele fazorului spațial pentru curent.

Dacă mărimile prescrise pentru curenții pe faze sunt fixe față de sistemul legat de stator ele pot fi considerate ca mărimi de curent continuu și se calculează cu relațiile:

$$\begin{aligned} i_a^* &= i_{sq}^* \\ i_b^* &= i_{sd}^* \cos 30^\circ - i_{sq}^* \cos 60^\circ \\ i_c^* &= -i_{sd}^* \cos 30^\circ - i_{sq}^* \cos 60^\circ \end{aligned} \quad (7.41)$$

Structura necesară pentru comanda pe principiul orientării după câmp este prezentată în fig.7.39. Mărimea de ieșire din regulatorul de viteză este mărime prescrisă pentru cuplu m^* iar prin împărțire cu fluxul ψ se obține componenta i_{sq}^* . Generatorul de funcții GF dă la ieșire o mărime constantă (fluxul nominal) pentru viteze mai mici decât viteza nominală care constituie mărimea prescrisă pentru flux ψ^* , iar la ieșirea din regulatorul de flux se obține componenta i_{sd}^* . Cu relațiile (7.40) se calculează i_{sd}^* și i_{sq}^* iar apoi curenții prescriși pentru fiecare fază i_a^* , i_b^* , i_c^* .

De remarcat că prin această metodă se poate asigura și o optimizare a factorului de putere.

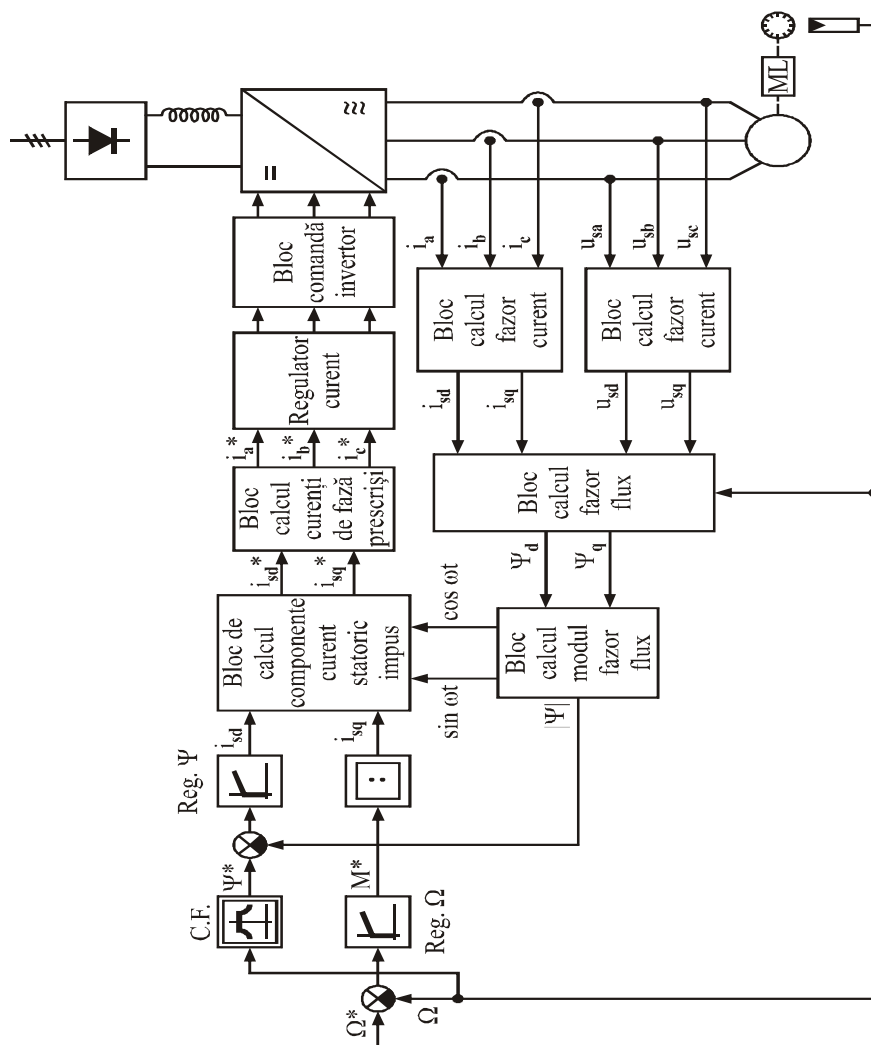


Fig.7.39. Schema structurală pentru comanda orientării după câmp.

7.7. Structura sistemelor de acționare pentru comanda directă a cuplului

Reglarea directă a cuplului (Direct Torque Control - DTC) se bazează pe teoria utilizată la comanda pe principiul orientării după câmp (după flux).

Pentru reglarea directă a cuplului, motorul și inverterul sunt considerate ca un ansamblu unitar iar procesele de comutație ale inverterului depind de starea electromagnetică a motorului.

Prin această metodă, motorul asincron poate fi condus rapid, fără să fie necesară reacția după viteză. Timpul de răspuns al sistemului este sub 2ms datorită utilizării unor circuite numerice specializate (ASIC) cu care se pot realiza funcții multiple de reglare.

Principalele componente ale sistemului de acționare pentru comanda directă a cuplului sunt blocurile de reglare prin histerezis a cuplului și a fluxului magnetic, care permit optimizarea procesului de comutație (fig.7.40), și blocul de modelare precisă a motorului. Pe baza informațiilor privind tensiunea continuă din circuitul intermediar și curenții pe două faze ale motorului, blocul de generare a modelului motorului calculează valorile efective pentru:

- cuplu;
- flux;
- viteză;
- frecvență.

Pornind de la valorile de referință pentru cuplu și flux, blocul logic de comandă optimizată determină cel mai bun vector de tensiune. Comparativ cu reglarea clasică a vitezei, comanda directă a cuplului se caracterizează prin faptul că pentru fiecare ciclu de reglare de 25 μ s, se determină comutația optimală.

Pentru a ilustra reglarea fluxului magnetic și a cuplului se consideră vectorul tensiunii de alimentare a statorului (fig.7.41) obținut pentru cele 8 combinații posibile de comutație ale inverterului. Pentru un inverter cu două nivele se obțin șase vectori de tensiune diferită de zero și doi vectori de tensiune nulă.

Fluxul statoric poate fi definit cu relația:

$$\underline{\phi}_s = \int (\underline{u}_s - R_s \underline{i}_s) dt \quad (7.42)$$

La reglarea directă a cuplului, fluxul statoric și cuplul sunt menținute în interiorul limitelor impuse prin histerezisul regulatorului, adică în interiorul benzii de toleranță ε^* . Când fazorul câmpului magnetic învârtitor al fluxului statoric atinge limita superioară sau inferioară a histerezisului, se modifică un vector de tensiune corespunzător pentru a modifica direcția fazorului fluxului statoric și pentru al menține în banda de histerezis.

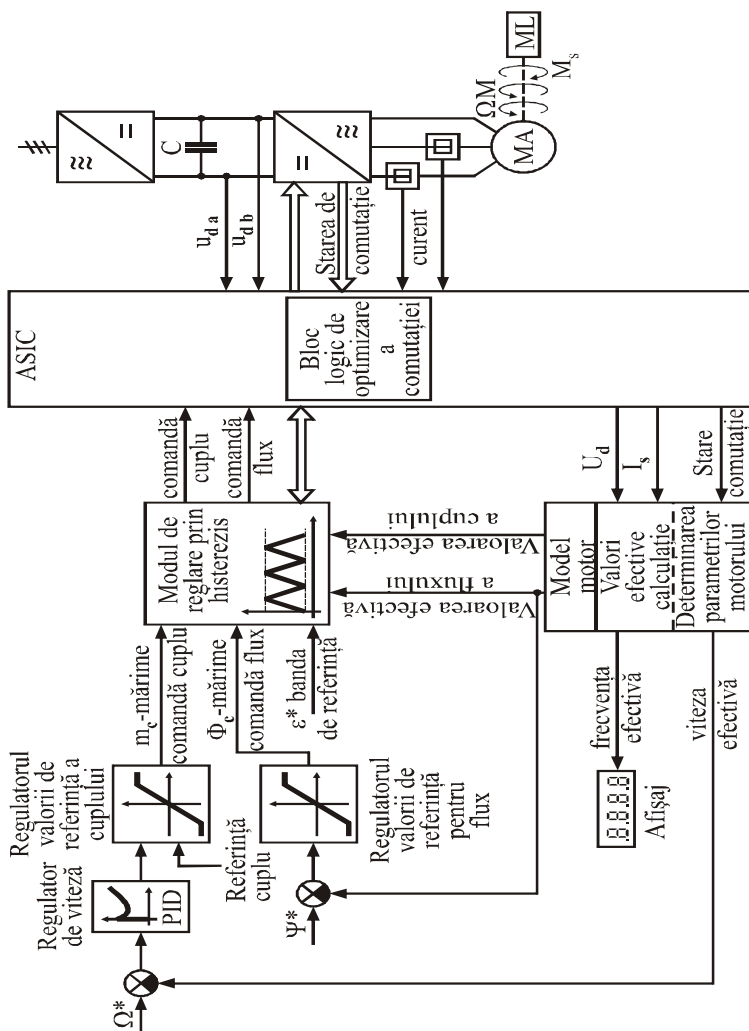


Fig.7.40. Schema structurală bloc a sistemului de acționare pentru comanda directă a cuplului.

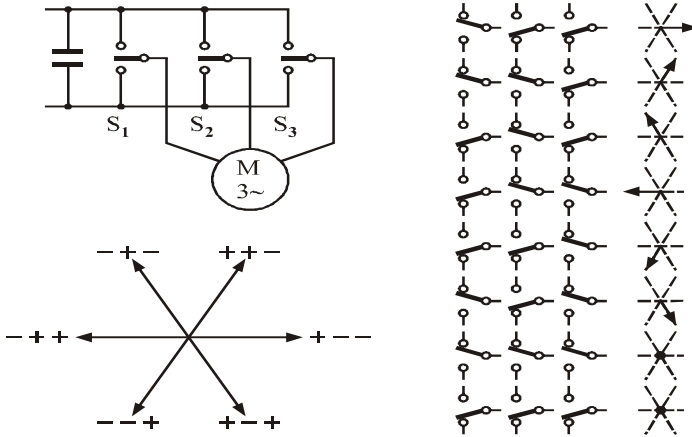


Fig.7.41. Reprezentarea stărilor de comutație și a vectorului tensiunii statorice.

Astfel, pentru situația prezentată în fig.7.42 se alege vectorul U_4 .

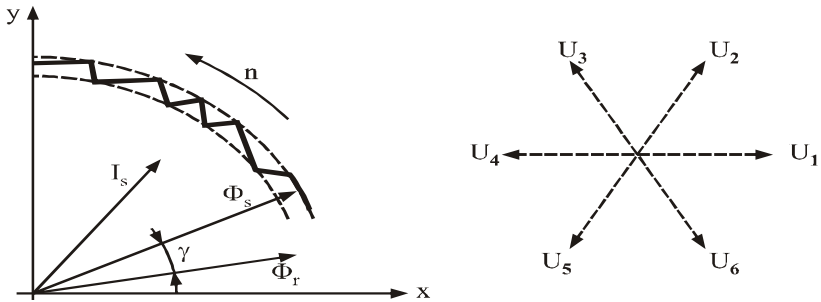


Fig.7.42. Reglarea directă a fluxului statoric.

Cuplul din întrefier M_e se obține ca produs vectorial dintre fluxul statoric și cel rotoric.

$$\underline{M}_e = k(\underline{\phi}_r \times \underline{\phi}_s) \quad (7.43)$$

Acesta va crește fie dacă fazorul fluxului, fie dacă unghiul γ dintre fazorii de flux crește. Constanta k depinde de numărul de perechi de poli, de reactanța de magnetizare și de factorul de scăpări magnetice ale motorului.

Pentru menținerea constantă a cuplului, știind că fluxul rotorice se modifică lent în raport cu fluxul statoric, se menține constant ϕ_s și se reglează unghiul γ dintre ϕ_s și ϕ_r . Astfel, dacă cuplul a atins limita maximă (fig.7.43), se alege un vector de tensiune nulă care conduce la diminuarea cuplului (m_0) iar când acesta atinge limita maximă se alege un vector de tensiune adecvat pentru creșterea cuplului (m_+).

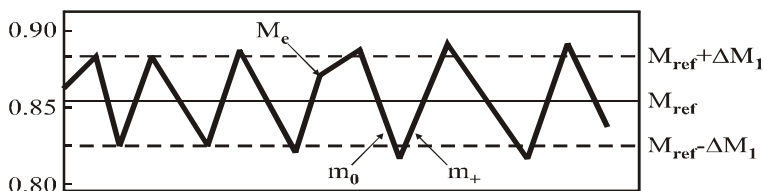


Fig.7.43. Comanda prin histerezis a cuplului.

Avantajele obținute prin reglarea directă a cuplului:

- utilizarea unei strategii de comandă fundamentală, valabilă pentru toate acționările cu motoare trifazate, indiferent de puterea motorului și de tipul regulatorului;
- o comportare dinamică foarte bună chiar pentru toate tipurile de aplicații, inclusiv la cele pentru care acționarea cu m.c.c. a dat rezultatele cele mai bune (ascensoare, instalații de ridicat, instalații de bobinat);
- nu necesită măsurarea vitezei și deci se poate renunța la traductorul de viteză, iar viteza reală poate fi afișată pe elementul de interfață cu operatorul;
- datorită comenzii rapide și precise a cuplului, sistemele bazate pe comanda directă a cuplului au o precizie dinamică ridicată;
- căderea de viteză determinată de șocurile de sarcină este mai mică decât în cazul acționărilor clasice;
- metoda asigură frânarea motorului prin controlul fluxului, pierderile se produc în stator iar disiparea căldurii se face mai ușor;
- modelul motorului permite calcularea fluxului magnetic optimal, în funcție de sarcina momentană, obținându-se o îmbunătățire a randamentului global al acționării, în special pentru sarcini reduse.

BIBLIOGRAFIE

- 1 Brașovan, M. *Acționări electromecanice*, Editura Tehnică, București, 1967
- 2 Brașovan, M., Seracin, E., Bogoevici, N., Kelemen, A., Trifa, V. *Acționări electrice. Aplicații industriale*, Editura Tehnică, București, 1977
- 3 Fransua, A., Măgureanu, R., Câmpăanu, A., Tocaci, M., Condruș, M. *Mașini și sisteme de acționări electrice. Probleme fundamentale*, Editura Tehnică, București, 1978
- 4 Ivanov, S. *Reglarea vectorială a sistemelor de acționare electronică*, Reprografia Univ. din Craiova, 2000
- 5 Kelemen, A., Imecs, Maria *Sisteme de reglare cu orientare după câmp ale mașinilor de curent alternativ*, Editura Academiei RSR, București, 1989
- 6 Manolea, Gh., Bitoleanu, Al. *PROSABIB – Library of programmes for designing electric driving systems*, A III-a Conferință națională de Acționări electrice, Brașov, mai 1982
- 7 Manolea, Gh. *Acționări electromecanice. Alegerea și verificarea motoarelor electrice de acționare*, Editura Universitaria, Craiova, 1993
- 8 Manolea, Gh. în colectiv *Sisteme eficiente energetice pentru instalații cu debite reglabile*, Editura Universitaria, Craiova, 1999
- 9 Manolea, Gh., Popescu, Gh., Boteanu, N., Drighiciu, A. M. *Acționări electromecanice. Sisteme*, Reprografia Universității din Craiova, 2001
- 10 Manolea, Gh. *Acționări electromecanice. Tehnici de analiză teoretică și experimentală*, Editura Universitaria, Craiova, 2003
- 11 Seracin, E., Popovici, D. *Tehnica acționărilor electrice*, Editura Tehnică, București, 1985
- 12 Străinescu, I. *Variatoare statice de tensiune continuă*, Editura Tehnică, București, 1983
- 13 Țopa, I. *Automatizarea acționărilor electrice*, Reprografia Universității din Brașov, 1980

CUPRINS

1 PRINCIPII PRIVIND COMANDA AUTOMATĂ SECVENȚIALĂ A	
ACTIONĂRILOR ELECTROMECHANICE	3
1.1 Clasificarea schemelor electrice	3
1.2 Semne convenționale	5
1.3 Comanda automată a pornirii prin cuplare directă la rețea	12
1.3.1 Schema de forță	12
1.3.2 Schema de comandă	13
1.4 Comanda automată a pornirii directe reversibile	14
1.4.1 Schema de forță	14
1.4.2 Schema de comandă	15
1.4.2.1 Schema de comandă clasică	15
1.4.2.2 Schema de comandă cu microcontroler	16
1.4.3 Aplicație industrială. Comanda automată a unui ascensor de materiale	18
1.5 Comanda automată a pornirii directe și frânarea dinamică	21
1.5.1 Schema de forță	21
1.5.2 Schema de comandă	21
1.5.2.1 Schema de comandă clasică	21
1.6 Comanda automată a pornirii stea-triunghi	22
1.6.1 Schema de forță	22
1.6.2 Schema de comandă	23
1.6.2.1 Schema de comandă clasică	23
1.6.2.2 Schema de comandă cu microcontroler	24
1.6.3 Schema logică	24
1.7 Comanda automată a pornirii reostatice a acționărilor electromecanice	26
1.7.1 Schema de forță	26
1.7.2 Schema de comandă pentru pornirea în funcție de timp	27
1.7.3 Schema de comandă pentru pornirea în funcție de viteză	27
1.7.4 Schema de comandă pentru pornirea în funcție de curent	28
1.7.5 Schema de comandă cu microcontroler	28
1.8 Comanda automată a acționării cu motor sincron	30
1.8.1 Comanda automată a pornirii în funcție de curent a acționării electromecanice cu motor sincron	30
1.8.2 Aplicație industrială. Sistem de automatizare a acționării compresoarelor din stațiile de pompare gaze naturale	31
1.9 Alegerea elementelor de alimentare, comandă și de protecție a acționărilor electromecanice	35
1.9.1 Alegerea secțiunii cablurilor de alimentare a motoarelor electrice de acționare	35
1.9.2 Alegerea contactoarelor de alimentare a motoarelor electrice de acționare	37
1.9.3 Alegerea și verificarea releelor termice	39
1.9.4 Alegerea și verificarea siguranțelor fuzibile	40
1.10 Mediu virtual pentru studiul comenzii automate a pornirii stea-triunghi a acționării cu motor asincron	41
2 ALEGEREA SISTEMELOR AUTOMATE DE ACȚIONARE ELECTROMECHANICĂ ..	46
2.1 Soluții generale.....	46
2.2 Criterii de alegere a unui sistem de acționare electromecanică	50
3 SISTEME DE ACȚIONARE ELECTROMECHANICĂ CU MOTOARE DE CURENT	
CONTINUU ȘI VARIATOARE DE TENSIUNE CONTINUĂ	60
3.1 Ecuația caracteristicii mecanice	62
3.2 Structura sistemelor de acționare cu m.c.c. și variatoare de tensiune continuă	64

3.3 Comanda adaptivă a sistemelor de acționare electromecanică cu m.c.c. și variatoare de tensiune continuă	65
4 SISTEME DE ACȚIONARE ELECTROMECHANICĂ CU MOTOARE DE CURENT CONTINUU ȘI REDRESOARE COMANDATE	69
4.1 Introducere	69
4.2 Analiza sistemelor de acționare electromecanică cu m.c.c. și redresoare comandate în funcție de numărul de cadrane în planul $MO\Omega$	69
4.2.1 Sisteme de acționare pentru funcționarea într-un singur cadran	70
4.2.2 Sisteme de acționare pentru funcționarea în două cadrane	71
4.2.3 Sisteme de acționare pentru funcționarea în toate cele patru cadrane	72
4.3 Structura și funcționarea sistemelor de acționare electromecanică cu m.c.c. și redresoare comandate	73
4.3.1 Structura	73
4.3.2 Funcționarea	80
4.4 Structura și funcționarea sistemelor de acționare electromecanică reversibile	81
4.4.1 Sisteme de poziționare	81
5 SISTEME DE ACȚIONARE ELECTROMECHANICĂ CU MOTOARE ASINCRONE ȘI VARIATOARE DE TENSIUNE ALTERNATIVĂ	83
5.1 Principiul sistemului de acționare	83
5.2 Structura sistemului de acționare	85
5.3 Comanda numerică a sistemelor de acționare cu motoare asincrone și variatoare de tensiune alternativă	87
5.4 Sistem de încălzire echipat cu motoare asincrone monofazate și variator de tensiune alternativă	88
5.4.1 Structura sistemului SIR DUNA 2000	88
5.4.2 Algoritmul de comandă	90
6 SISTEME CU MOTOARE ASINCRONE CU ROTOR BOBINAT PENTRU REGLAREA VITEZEI PRIN MODIFICAREA ENERGIEI DE ALUNECARE	95
6.1 Sisteme pentru reglarea vitezei prin disiparea energiei de alunecare	95
6.2 Sisteme pentru reglarea vitezei prin recuperarea energiei de alunecare	96
6.2.1 Sisteme pentru reglarea vitezei la putere constantă	97
6.2.2 Sisteme pentru reglarea vitezei la cuplu constant	102
7 SISTEME DE ACȚIONARE ELECTROMECHANICĂ CU MOTOARE ASINCRONE ȘI CONVERTOARE STATICE	104
7.1 Principiul reglării vitezei	104
7.2 Ecuația caracteristicii mecanice	105
7.3 Structura părții de forță a sistemelor de acționare cu motoare asincrone și convertoare statice	107
7.4 Sisteme de acționare cu motor asincron și convertor static cu circuit intermediar de tensiune continuă variabilă	108
7.4.1 Comanda la $U/f=ct$	108
7.5 Sistem de acționare cu motor asincron și convertor static cu circuit intermediar de tensiune continuă constantă	111
7.5.1 Sisteme în circuit deschis	111
7.5.2 Sisteme în circuit închis	118

7.6 Structura sistemelor de acționare comandate pe principiul orientării după câmp	124
7.7 Structura sistemelor de acționare pentru comanda directă a cuplului	130
Bibliografie	134